

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

Návrh systému pro generování digitálně modulovaných signálů

Generation of Digitally Modulated Signals

2013

Bc. Strakoš Adam

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Adam Strakoš**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Návrh systému pro generování digitálně modulovaných signálů**
Generation of Digitally Modulated Signals

Zásady pro vypracování:

- 1) Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.
- 2) Přístroje a nástroje pro generování digitálně modulovaných signálů. Srovnání klasické a virtuální instrumentace pro tuto aplikační oblast.
- 3) Blokové schéma pro generování digitálně modulovaného signálu a jeho implementace do grafického vývojového prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit.
- 4) Návrh a implementace aplikace pro generování digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového generátoru na bázi PXI modulárního systému.
- 5) Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro generování digitálně modulovaného signálu.
- 6) Vyhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

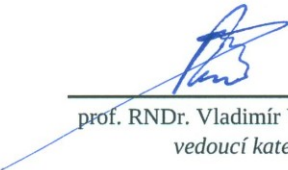
- [1] CLARK, Cory L. LabVIEW digital signal processing and digital communications. New York: McGraw-Hill, 2005. ISBN 00-714-6966-4
- [2] LINNARTZ, Tim Schenk and Jean-Paul. RF imperfections in high-rate wireless systems impact and digital compensation. Online-Ausg. Dordrecht: Springer, 2008. ISBN 978-140-2069-031.
- [3] HICKMAN, Ian. Practical radio-frequency handbook. 4th ed. Oxford: Newnes, 2007. ISBN 978-0-7506-8039-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Žídek, CSc.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 23. 4. 2013

Hub. A.
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval *doc. Ing. Janu Žídkovi, CSc.* za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá popisem vlastností moderních bezdrátových technologií. Vysvětluje principy digitálních modulací, popisuje jejich vliv na podobu signálu a vysvětluje teorii přenosu signálu přenosovou cestou. Jsou zde popsány degradační vlivy, které působí na signál v reálném přenosovém kanále. Dále práce seznamuje s reálnými přístroji a nástroji, které umožňují generování digitálně modulovaného signálu jak z klasické, tak i z virtuální instrumentace. Diplomová práce obsahuje blokové schéma pro generování digitálně modulovaného signálu. Praktická část diplomové práce je zaměřena na návrh aplikace, která slouží pro generování digitálně modulovaného signálu v ideálním stavu, ale i ve variantách s různými druhy degradace. Dále je tato aplikace testována na reálném hardwaru od firmy National Instruments a je zde navrženo měření degradačních vlivů reálného přenosového kanálu na digitálně modulovaný signál.

Klíčová slova

Bezdrátový přenos dat, digitální signál, digitální modulace, degradace signálu, virtuální přístroj, měření, signál vektorový generátor, virtuální přístroj, chyby signálu, LabVIEW, Modulation toolkit, RM OSI.

Abstract

This thesis describes the properties of modern wireless technologies. Explains the principles of digital modulation, describes their influence on the signal and explains the theory of signal transmission over transmission path. There are described degradative influences that affect the signal in the real transmission channel. The thesis also deals with real instruments and devices that allow generation of digitally modulated signal. Those devices are divided into classical and virtual instrumentation. The thesis contains flowchart of the generating digitally modulated signals. The practical part of the thesis is focused on the design application that is used for generating digitally modulated signal in ideal condition and also with different types of degradation. Further, this application is tested on real hardware from National Instruments, and is here proposed measurement of degradation effects in real transmission channel to a digitally modulated signal.

Key words

Wireless data transmission, digital signal, digital modulation, signal degradation, virtual instrument measurement, vector signal generator, virtual machine, signal errors, LabVIEW Modulation Toolkit, RM OSI.

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
T	Bd	Modulační rychlost
f	Hz	Frekvence
t	s	Čas
β	-	Roll-off faktor
v_{\max}	%	Odstranění závislosti na zesílení distribučního systému
$V_{\text{přenosová}}$	b/s	Přenosová rychlost
$V_{\text{modulační}}$	Bd	Modulační rychlost
T_s	Bd	Symbolová rychlost
\mathbf{e}	-	Chybový vektor
$\varphi(t)$	°	Fázový posuv
\mathbf{w}	-	Přijatý sobolový vektor
\mathbf{v}	-	Ideální symbolový vektor
I_t	-	Ideální velikost složky I
Q_t	-	Ideální velikost složky Q
$\mathbf{h}(t)$	-	Impulzní odezva filtru
$H(f)$	-	Chování filtru ve frekvenční oblasti
Δf	Hz	Přebytečná šířka pásma
n	-	Počet možných stavů
δI_t	-	Rozdíl velikostí přijaté složky I od ideální složky I
δQ_t	-	Rozdíl velikostí přichozí složky Q od ideální složky Q

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Anglický význam	Český význam
RM OSI	Open Systems Interconnection	Propojení otevřených systémů
ISO	International Organization for Standardization	Mezinárodní organizace pro standardizaci
Wi-fi	Wireless Fidelity	Komunikační standart pro bezdrátový přenos dat
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution	Technologie rozšiřující možnosti telekomunikační sítě GSM
GSM	Global System for Mobile Communications	Globální Systém pro Mobilní komunikaci
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	Typ telekomunikační sítě
GPRS	General Packet Radio Services	Služba pro přenos dat v sítích GSM
GPS	Global Positioning system	Globální družicový polohový systém
SRRC	Square Root Raised Cosine Filter	Square Root Raised Cosine Filtr
RRC	Root Raised Cosine Filter	Root Raised Cosine Filtr
RC	Raised Cosine Filter	Raised Cosine Filtr
Q	Quadrature-phase	Q složka fázoru I/Q modulace
I	In-phase	I složka fázoru I/Q modulace
PSK	Phase Shift Keying	Fázová digitální modulace
FSK	Frequency Shift Keying	Frekvenční digitální modulace
ASK	Amplitude Shift Keying	Amplitudová digitální modulace
PM	Phase Modulation	Fázová analogová modulace
FM	Frequency Modulation	Frekvenční analogová modulace
AM	Amplitude Modulation	Amplitudová analogová modulace
QAM	Quadrature amplitude modulation	Druh digitální modulace
PAM	Pulse Amplitude Modulation	Pulsní amplitudová modulace
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying	Druh MSK modulace
MSK	Minimum Shift Keying	Typ digitální modulace
MXI	Multisystem eXtension Interface	Softwarově transparentní linka
MER	Modulation Error Ratio	Modulační chyba
EVM	Error Vector Magnitude	Amplituda chybového vektoru

RF	Radio-Frequency	Rádiový signál
AWG	Arbitrary waveform Generator	Generátor libovolného průběhu
CW	Continuous wave	Nepřetržitá vlna
VI	Virtual Instrumentations	Programy, jejichž vzhled a činnost připomínají skutečný přístroj
RMS	Root Mean Square	Efektivní hodnota
MT	Modulation Toolkit	Modulation Toolkit

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.....	2
2.1	Přechod od analogového přenosu k digitálnímu.....	2
2.2	Vývoj přenosové cesty	2
2.3	Komunikace zařízení	3
2.4	RM ISO/OSI.....	3
2.5	Přenos dat	4
2.6	Zavádění digitálních modulací	5
2.6.1	I/Q modulace	5
2.6.2	Vektorový diagram.....	6
2.6.3	Konstelační diagram.....	6
2.7	Frekvenční filtrace v digitálních modulacích	6
2.8	Modulační rychlost a její vztah k přenosové rychlosti	8
2.9	Používané digitální modulace v telekomunikačních sítích.....	9
2.9.1	GSM (Global System for Mobile Communications).....	9
2.9.2	EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution).....	10
2.9.3	UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)	10
2.10	Degradační vlivy signálu.....	11
2.10.1	Vícecestné šíření.....	11
2.10.2	Úniky	11
2.10.3	Chyba amplitudy	11
2.10.4	Rozdíl amplitud	12
2.10.5	Chyba fáze - Jitter, wander	12
2.11	Měření parametrů digitální modulace	12
2.11.1	Modulační chyba - MER (Modulation Error Ratio).....	12
2.11.2	Amplituda chybového vektoru – EVM (Error Vector Magnitude)	13
3	Přístroje a nástroje pro generování digitálně modulovaných signálů. Srovnání klasické a virtuální instrumentace pro tuto aplikační oblast.....	14
3.1	Klasická instrumentace.....	15
3.2	Rozdělení přístrojů	15
3.3	Generátory signálu	15

3.3.1	Funkční generátory (Function generators).....	16
3.3.2	Generátory libovolných průběhů	16
3.3.3	RF a mikrovlnné generátory signálů (radio frequency).....	16
3.3.4	Generátory vektorového signálu (Vector Signal Generators).....	17
3.4	Virtuální instrumentace	17
3.5	Porovnání klasické a virtuální instrumentace	18
4	Blokové schéma pro generování digitálně modulovaného signálu a jeho implementace do grafického vývojového prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit	19
4.1	Návrh systému digitálního přenosového řetězce pro bezdrátový přenos dat vysílací část.....	21
4.1.1	Nahrazení vysílací části blokového diagramu v prostředí LabVIEW s použitím knihovny Modulation Toolkit.	21
5	Návrh a implementace aplikace pro generování digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového generátoru na bázi PXI modulárního systému.	25
5.1	Tvorba blokového diagramu.....	25
5.1.1	Blok pro nastavení základních parametrů.....	25
5.1.2	Blok tvorby digitálně modulovaného signálu.....	26
5.1.3	Blok simulace reálných podmínek přenosového kanálu	26
5.1.4	Blok pro zahájení generování signálu	27
5.1.5	Blok cyklického generování signálu.....	28
5.1.6	Blok ukončení generování	29
5.2	Popis uživatelského rozhraní	30
5.2.1	Část pro nastavení parametrů generování.....	31
5.2.2	Část pro simulaci reálných podmínek přenosového kanálu.....	31
5.3	Část zobrazování průběhu generování.....	33
6	Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro generování digitálně modulovaného signálu.....	36
6.1	Měření vlivu bílého šumu.....	37
6.2	Měření vlivu šumové hustoty (fázového šumu)	39
6.3	Měření vlivu chyby ortogonality	41
6.4	Měření vlivu nerovnováhy zisku	43
6.5	Měření vlivu I DC offsetu	45
6.6	Měření vlivu Q DC offsetu.....	47
7	Závěr.....	49
	Použitá literatura	50

Seznam obrázků	52
Seznam tabulek	54
Seznam příloh.....	55

1 Úvod

V dnešní době se pro přenos dat v telekomunikačních sítích hojně využívají digitálně modulované signály. Do budoucna se zcela jistě budou digitální modulace nadále prudce rozvíjet spolu s technologiemi pro bezdrátový přenos informace. Spolu s vývojem digitálních modulací je zapotřebí vyvíjet přístroje a nástroje, které umožňují testovat systémy používající digitální modulace. Mezi tyto přístroje a nástroje zahrnujeme také zdroje digitálně modulovaných signálů, které umožňují generovat digitálně modulovaný signál v jeho ideální nebo i degradované podobě. Z tohoto důvodu vzniká aktuální potřeba se zabývat problematikou generování digitálně modulovaných signálů.

Diplomová práce obsahuje (kromě úvodu) pět základních kapitol.

V kapitole 2, nazvané *„Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.“*, jsem se zaměřil na důvody přechodu od analogového signálu k digitálnímu signálu, vývojem přenosových cest a komunikačních zařízení u bezdrátových přenosů. Dále v této kapitole popisuji model RM ISO OSI, věnuji se významu jeho fyzické vrstvy pro vlastní komunikaci a pro přenos dat. Poté zde popisuji základní vlastnosti digitálních modulací, způsoby degradace digitálně modulovaných signálů a jejich praktické využití v moderních telekomunikačních sítích.

Třetí kapitola - *„Přístroje a nástroje pro generování digitálně modulovaných signálů. Srovnání klasické a virtuální instrumentace pro tuto aplikační oblast.“* - je zaměřena na popis vlastností přístrojů určených pro generování digitálně modulovaných signálů, jejich rozdělením a jejich použitím v praxi.

Další kapitola, nazvaná *„Blokové schéma pro generování digitálně modulovaného signálu a jeho implementace do grafického vývojového prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit.“*, se zabývá analýzou obecného přenosového řetězce digitálně modulovaného signálu a také pojednává a popisuje implementaci tohoto řetězce do grafického vývojové prostředí LabVIEW s využitím rozšiřující knihovny Modulation Toolkit.

V kapitole *„Návrh a implementace aplikace pro generování digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového generátoru na bázi PXI modulárního systému.“* popisuji podrobněji vlastní tvorbu aplikace pro generování digitálně modulovaného signálu v grafickém vývojovém prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit a popisuji funkčnost jednotlivých částí této aplikace.

Poslední kapitola s názvem *„Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro generování digitálně modulovaného signálu.“* je zaměřena na samotné experimentální ověření funkčnosti mnou vytvořené aplikace pro generování digitálně modulovaného signálu s využitím reálného hardware. Jako reálný hardware jsem využil vektor signálový generátor, který je založen na platformě PXI systému od firmy National Instruments.

2 Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

2.1 Přechod od analogového přenosu k digitálnímu

Éru moderních komunikací zahájil Morseův telegraf, ovšem s rozvojem Bellova telefonu převládly ve světě spoju analogové přenosy a zpracování analogových signálů. Za analogový signál považujeme takový signál, který je spojitý v čase i amplitudě. Analogová veličina je tedy spojitá a může nabývat nekonečně mnoha různých hodnot. Právě v tom, že obsahuje nekonečně mnoho hodnot, spočívá největší problém při přenosu signálu. Teoreticky analogový signál může zabírat nekonečně velkou frekvenční šířku pásma. Signál jako takový se tedy musí ovlivňovat (nebo upravovat) pro praktické použití různými filtry. Dalším problémem u analogového signálu je to, že přenos analogové veličiny (signálu) je vždy zatížen určitým zkreslením, útlumem a dalšími degradačními změnami přenášené veličiny, což je dáno reálnými obvodovými vlastnostmi přenosových cest. Z tohoto důvodu nelze analogový signál přenést naprosto přesně a jeho přenos je vždy zatížen určitou mírou zkreslení signálu. Ještě horší je situace, kdy analogový signál postupně prochází řetězcem zpracování a přenosů a nepřesnosti se akumulují. Lidé v dnešní době již dokázali přenos pomocí analogových veličin dovést k takové dokonalosti, že míra nepřesnosti přenosu může být poměrně malá. Ovšem tato řešení jsou technicky náročná a také velmi nákladná. Také v dnešní době zažíváme bouřlivý rozvoj digitálních technologií obecně. Z těchto důvodů se v dnešní době přechází na přenosy signálů pomocí digitálních veličin.

Na rozdíl od analogového signálu digitální signál nabývá pouze konečného počtu diskrétních hodnot. Přenos digitální veličiny je také zatížen určitou chybou vzniklou při přenosu signálu, ale na rozdíl od přenosu analogového signálu je poměrně jednoduché tyto chyby eliminovat. Mezi výhody digitálního přenosu tedy patří: přenos může být ideální (kvalita přenášené informace se nemění), umožňuje dosahovat vyšších přenosových rychlostí, může být bezpečnější (přenášená data lze snadněji šifrovat), energeticky efektivnější a data lze snadno zpracovávat. [1]

2.2 Vývoj přenosové cesty

V minulosti se jako přenosová cesta nejčastěji používalo metalické vedení. To bylo způsobeno historickým vývojem telefonní infrastruktury. Metalické vedení se lidé naučili snadno a levně vyrábět, používat a instalovat v různých aplikacích. Avšak tato technologie dospěla ke svým hranicím použitelnosti. Technologická hranice přenosové rychlosti na metalickém vedení je dnes přibližně 10Gb/s na vzdálenost několika metrů. Z důvodu, že tato technologie dosáhla maxima technologických možností, další vývoj se již vydal odlišnými směry, a to k použití optického vedení a bezdrátové komunikace.

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

U optického vedení se využívá jako médium optické vlákno. Optické vlákno je dielektrický vlnovod, ve kterém se šíří elektromagnetické vlny (zpravidla světlo či infračervené záření) ve směru osy s využitím principu absolutního odrazu na rozhraní dvou prostředí s rozdílným indexem lomu. U optického vedení můžeme využít mnoha výhod, které například přináší:

- velká šířka pásma,
- vyšší přenosové rychlosti na velkou vzdálenost,
- nízký útlum,
- odolnost proti elektromagnetické interferenci,
- bezpečnost přenosu (signál nelze jednoduše vyvázat),
- vyrábí se z křemíku, který je snadno dostupný z přírodních zdrojů.

Ovšem optické vedení také přináší i jisté nevýhody. Nevýhodami jsou hlavně poměrně vysoké pořizovací náklady, křehkost optického vlákna a náročnější konektování. Jelikož optické vedení má řadu výhod, které převažují nad nevýhodami, v dnešní době se jedná o velmi rozšířenou technologii.

U bezdrátové komunikace se využívá toho, že signál se šíří volným prostorem pomocí elektromagnetických vln. Díky této vlastnosti není potřeba pokládat vedení, a tudíž uživatelé nejsou poutáni k infrastruktuře a mohou se s koncovým zařízením volně pohybovat, což je největší výhoda této komunikace. Bezdrátové komunikace mají omezení: omezená dostupnost frekvencí a tedy omezená přenosová kapacita, větší vliv prostředí (rušení, interference, podmínky příjmu), větší zranitelnost (vůči odposlechům, útokům), bezdrátová komunikace se šíří volným prostředím a to je vždy sdílené médium. I přes tyto nevýhody se dnes bezdrátový přenos začal hojně využívat. Rozlišujeme bezdrátové přenosy optické, mikrovlnné, infračervené a rádiové. [2]

2.3 Komunikace zařízení

V dnešní době je využívání bezdrátových přenosů velmi populární a ustálil se způsob přenášení informačního obsahu za pomoci bezdrátových komunikací. Z důvodu, že se ve světě vyvíjí různé druhy zařízení (mobily, počítače, tablety, atd.) vzniká potřeba vzájemné komunikace mezi těmito zařízeními a zároveň mizí rozdíly mezi jednotlivými zařízeními, která se stávají multifunkčními. Například v mobilním telefonu je možno zapnout navigaci, pustit hudbu nebo si na něm otevřít textový soubor podobně jako v osobním počítači. Z tohoto důvodu vzniká v tomto oboru mnoho různých standardů pro společnou komunikaci jednotlivých zařízení nebo standardy pro komunikaci s vnějšími sítěmi. Jako jsou Wi-Fi, GPRS, EDGE, ZigBEE, Bluetooth, GSM atd.

2.4 RM ISO/OSI

Základní principy pro fungování těchto standardů definoval referenční model (RM) OSI (Open Systems Interconnection). RM OSI definovala organizace ISO (the International Organization for Standardization). Jedná se o referenční model pro propojení otevřených systémů. Je to soubor norem potřebných pro výměnu informací mezi systémy. V této normě je systém definován jako seskupení složené z jednoho nebo několika počítačů, příslušného programového vybavení, venkovních zařízení, terminálů, lidských operátorů, fyzických procesů, prostředků na přenos informací atd.. RM OSI se vztahuje tedy na výměnu informací mezi jednotlivými systémy (veřejnými i privátními v kombinaci s rozlehlými či lokálními) s tím, že spojení mezi dvěma koncovými účastníky může

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

ve skutečnosti procházet přes jednu či více mezilehlých sítí, tedy obsahuje i normy pro schopnost spolupráce jednotlivých systémů. Základní model RM OSI obsahuje sedm vrstev. Jednotlivé vrstvy modelu RM OSI mají za úkol následující úlohy.

Aplikační vrstva zabezpečuje přijímání a zpracování standardních požadavků aplikací. Programy se na tyto služby pouze odkazují. Nejčastější služby, které tato vrstva vykonává, jsou přenos souborů, elektronická pošta, vzdálené připojení atd.

Prezentační vrstva zajišťuje překlad dat mezi systémy. Jedná se o překlad v případě použití různého kódování v systémech. V této vrstvě dále také může být realizováno šifrování nebo komprese dat.

Relační vrstva má za úkol navázání a řízení komunikace mezi jednotlivými uzly. Její úkolem je i ukončení navázané relace.

Transportní vrstva se stará o správu paketů. Pakety jsou zde před příjmem vytvářeny a po příjmu sestavovány.

Síťová vrstva má za úkol nalézt cestu k cíli v případě, že mezi odesílatelem a příjemcem neexistuje přímé spojení. V tomto případě určuje cestu přes jednotlivé spojovací prvky (musí znát přesnou topologii sítě).

Linková vrstva zajišťuje samotný přenos dat mezi dvěma přímo spojenými uzly. Zajišťuje správné vyslání, příjem a kontrolu přenášených rámců. Také v případě chyby vyžádá opakování přenosu rámce.

Fyzická vrstva specifikuje fyzickou komunikaci. Aktivuje, udržuje a deaktivuje fyzické spoje mezi koncovými systémy, spolupracuje na efektivním rozložení všech zdrojů mezi všechny uživatele a moduluje, neboli konvertuje digitální data na signály používané přenosovým médiem. Fyzická vrstva se tedy stará například o to, jakým způsobem jsou datové bity zakódovány do takového signálu, jaký se skutečně přenáší, jaký je časový průběh tohoto signálu, jaké jsou obvodové vlastnosti přenosových cest apod. Fyzická vrstva nabízí vyšší vrstvě pro představu služby typu „přijmi bit“ a „odešli bit“. Uživatel těchto služeb se pak již nezabývá tím, jak konkrétně se který bit přijímá či odesílá. Naproti tomu fyzická vrstva se nezajímá o význam bitů, které přenáší. [3]

2.5 Přenos dat

Tato práce se zabývá právě generováním signálů na **fyzické vrstvě** modelu RM OSI, přesněji částí modulace (konverze) dat na signály používané přenosovým médiem a jejich přenos.

Potřebujeme-li přenášet binární data po vodičích, můžeme obě možné binární hodnoty reprezentovat napětím na vodiči jednou nulovou a druhou nenulovou úrovní nebo jednou zápornou a jednou nezápornou úrovní. Používají se ovšem i složitější vyjádření hodnot pomocí napětíových úrovní. Všechny tyto přenosy jsou označovány jako přenosy v základním pásmu.

Problémem je, že signál v základním pásmu je nevhodný pro přenos přes bezdrátové sítě. Z tohoto důvodu se začal využívat přenos v takzvaném přeloženém pásmu, při kterém je přenášen signál, který se šíří přenosovým médiem co možná nejlépe. Obvykle se jedná o pravidelně se měnící signál sinusového průběhu, který je nazýván pojmem harmonický signál (označován jak nosný). Informace jako taková se poté přenáší pomocí změn v průběhu nosného harmonického signálu.

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

Provádění těchto změn podle užitečné informace se nazývá modulace. Zařízení, které provádí modulaci, se jmenuje modulátor. Modulace jako takové se využívá pro efektivnější přenos dat. Existují různé možnosti modulace nosného signálu. U analogového signálu jsou základní modulace:

- amplitudová modulace (AM), při které jsou jednotlivé hodnoty užitečného signálu vyjádřeny pomocí změny amplitudy nosného signálu,
- frekvenční modulace (FM), při které jsou jednotlivé hodnoty užitečného signálu vyjádřeny pomocí změny frekvence,
- fázová modulace (PM), při které jsou jednotlivé hodnoty užitečného signálu vyjádřeny pomocí změny fáze.

Podobně jako u analogových signálů i u digitálních signálů je zapotřebí využívat modulace nosného signálu. Používají se obdoby analogových modulací v digitální podobě a to ASK (obdoba AM-dnes se již nepoužívá), FSK (obdoba FM) a PSK (obdoba PM). A samozřejmě také složitější modulace. [4]

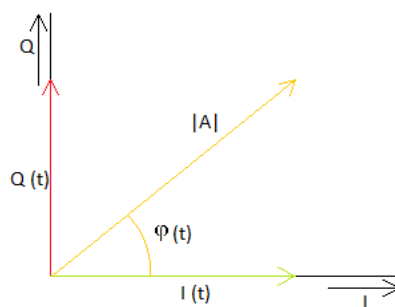
2.6 Zavádění digitálních modulací

V dnešní době získává digitální modulace stále větší popularitu, z potřeby přenosu většího objemu dat pro mnohem více uživatelů. Díky digitální modulaci efektivněji využíváme frekvenční pásmo, zvyšujeme přenosovou kapacitu, zlepšujeme zabezpečení dat, zrychluje se použitelnost systému a dostává se tedy do popředí před klasické analogové modulace využívané hlavně v minulosti. Digitální modulace znamená, že zdroj modulačního signálu je signál diskretní. Obvykle bitová posloupnost.

Tento přechod od analogových signálů k digitálním představuje přechod od **skalárních k vektorovým** signálům umožňujícím přenést větší objem dat. [5]

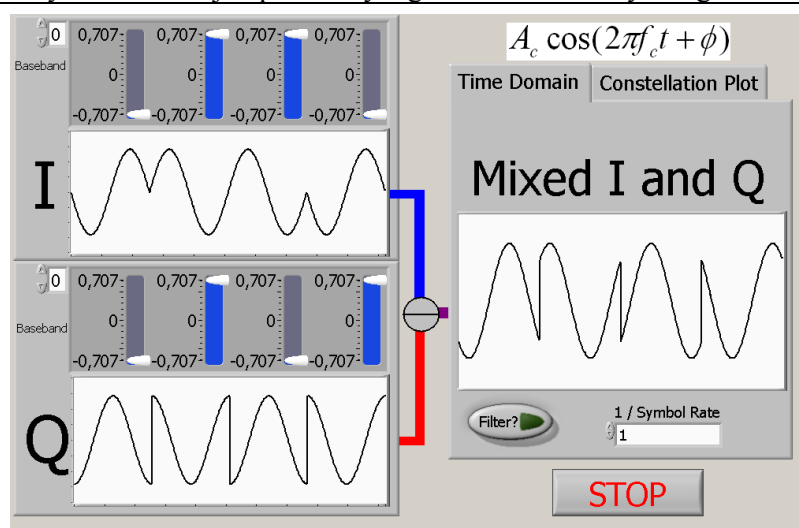
2.6.1 I/Q modulace

Většinu modulačních metod používaných v digitálních komunikacích lze realizovat pomocí IQ modulátorů. IQ modulátor je založen na skutečnosti, že vysokofrekvenční signál o konstantní úhlové frekvenci (ω) a o proměnné fázi (ϕ) a amplitudě (A) je možné zobrazit v komplexní rovině jako fázor (viz. Obr. 2. 1). Tento fázor je složený ze dvou složek - $I(t)$ (In-phase) a $Q(t)$ (Quadrature-phase). Tyto složky mají shodné frekvence, ovšem jsou fázově posunuty o 90° . Ovlivňování parametrů nosné vlny pouze v rámci dvou diskretních stavů se označuje pojmem klíčování. [5]



Obrázek 2.1: I/Q diagram

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.



Obrázek 2.2: Reálná podoba I,Q a kompozitní složky digitálního signálu v čase

Na obrázku (viz. Obr. 2. 2) vidíme, jak přesně vypadají v reálné podobě v časové oblasti I, Q a kompozitní složky I/Q modulace.

2.6.2 Vektorový diagram

Vektorový diagram vzniká plynulým zobrazením obou modulačních složek I a Q. Zobrazuje jednotlivé stavy i přechody mezi nimi. V tomto diagramu je možno vidět jednotlivé cesty přechodu nosné vlny z jednoho stavu do druhého, ovšem nejsou přesně vidět chyby v jednotlivých stavových polohách. [6]

2.6.3 Konstelační diagram

Tento diagram do roviny IQ zobrazuje pouze jednotlivé výslednice obou modulačních složek. Konstelační diagram je podobný fázorovému diagramu, zobrazuje však pouze koncový bod fázoru tak jak je opakovaně snímán v okamžicích rozhodnutí, kdy je signál vzorkován. Z tohoto diagramu lze snáze vyhodnotit různé druhy degradace signálu. [6]

2.7 Frekvenční filtrace v digitálních modulacích

Digitální modulace představuje skokovou změnu některého parametru v sinusovém průběhu nosné, z čehož plyne, že pro přenos všech frekvenčních složek tohoto modulovaného signálu by bylo zapotřebí nekonečně široké frekvenční pásmo a přenos všech těchto frekvenčních složek by byl v praxi nerealizovatelný a zbytečný z důvodu, že hlavní část energetického obsahu se přenáší v hlavním laloku frekvenčního spektra. Z tohoto důvodu se používají frekvenční filtry, takzvané dolní propusti. Filtry mají za úkol redukovat potřebnou velikost frekvenčního pásma. Některé typy filtrů ovšem způsobují značné zpoždění. Za konečný důsledek zpoždění považujeme nutnost výrazného zvýšení vysílacího výkonu.

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

Filtrace v základním pásmu je výhodná i při rádiovém přenosu. V praxi se při návrhu filtrů využívají následující metody:

- filtrace na nulové intersymbolové interference dosahovaná při minimální šířce pásma. Tato metoda využívá tzv. kosinusové filtry RC (Root Raised Cosine Filters nebo Raised Cosine Filters) nebo kosinusové filtry SRRC (Square Root Raised Cosine Filters),
- předmodulační filtrace ve vysílači pomocí gaussovských dolních propustí,
- filtrace pomocí přizpůsobeného filtru na vstupu přijímače. Tato metoda maximalizuje poměr signál/šum,
- filtrace na vstupu přijímače tzv. integrace s resetováním blížícím se k nule.

Na obrázku (viz. Obr. 2. 3) je vidět vliv Raised Cosine filtru na I a Q složku při použití v modulaci 8-PSK. [3]

Chování Raised cosine filtru lze vyjádřit ve frekvenční oblasti následující rovnicí:

$$|H(f)| = \begin{cases} 1 & |f| \leq \frac{1}{2T} \\ \cos^2\left(\frac{\pi T}{2} (f - \frac{1}{2T})\right) & \frac{1}{2T} < |f| < \frac{1}{2T}(1+\beta) \\ 0 & |f| \geq \frac{1}{2T}(1+\beta) \end{cases}$$

kde T je modulační rychlost, β je Roll-off faktor a nabývá hodnot od 0 do 1 a f je frekvence signálu.

Impulzní odezva takového filtru pak je:

$$h(t) = \frac{1}{T} \begin{cases} \cos^2\left(\frac{\pi T}{2} (t - \frac{1}{2T})\right) & \frac{1}{2T} < t < \frac{1}{2T}(1+\beta) \\ 1 & |t| \leq \frac{1}{2T} \\ 0 & |t| \geq \frac{1}{2T}(1+\beta) \end{cases}$$

kde T je modulační rychlost, β je Roll-off faktor a nabývá hodnot od 0 do 1 a t je čas.

Roll-off faktor, značený β , je naměřená hodnota nadměrné šířky pásma filtru, tj. šířka pásma, která se vyskytuje mimo Nyquistovu šířku pásma $\frac{1}{2T}$, pokud označíme přebytečnou šířku pásma jako Δf poté platí:

$$\beta = \frac{\Delta f}{\frac{1}{2T}}$$

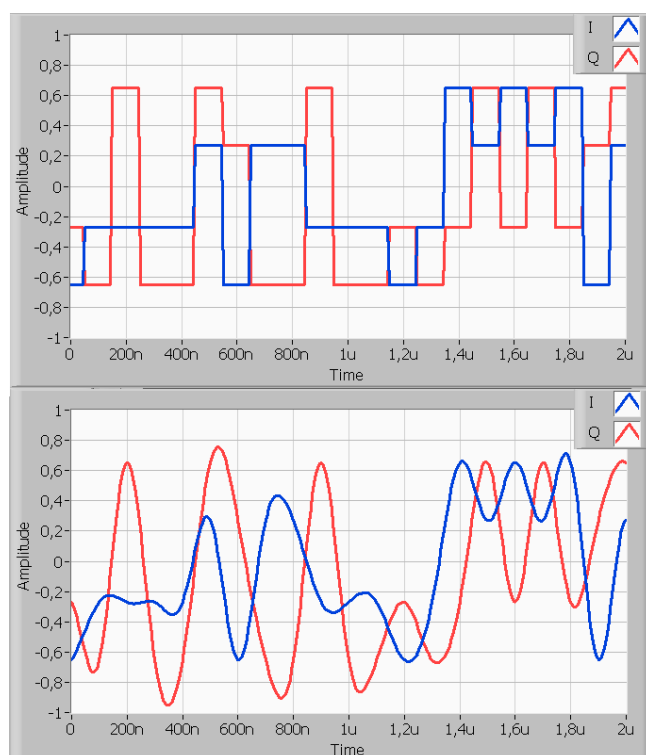
kde β – a vyjadřuje sobolovou rychlost, T je modulační rychlost a f je frekvence signálu.

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

Impulzní odezva Root Raised cosine filtru je popsána rovnicí:

$$h(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos\left(\frac{\pi}{2T} t\right) \right) & 0 \leq t \leq T \\ \frac{1}{2} \left(1 + \cos\left(\frac{\pi}{2T} (2T - t)\right) \right) & T \leq t \leq 2T \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$$

kde $\frac{1}{2T}$ je převrácená hodnota modulační rychlosti, α je Roll-off faktor a nabývá hodnot od 0 do 1 a t je čas.



Obrázek 2.3: Vliv použití Raised Cosine filtru v 8-PSK modulaci

2.8 Modulační rychlost a její vztah k přenosové rychlosti

Přenosová rychlost má jednotku bity za sekundu a rychlost modulační se udává jako počet symbolů za sekundu. Rozdíl mezi přenosovou rychlostí a modulační rychlostí určuje, kolik různých alternativ reprezentuje jedna změna skutečně přenášeného signálu. V případě reprezentuje-li jedna změna skutečně přenášeného signálu dvě možné hodnoty, pak platí co změna, to jeden bit. V případě volby mezi čtyřmi možnostmi, pak může každá změna reprezentovat dvojici binárních číslic. Obecně lze tedy říci, že počet bitů nesený jednou změnou signálu je logaritmus o základu 2 z počtu stavů.

kde R_b je přenosová rychlost [bit/s], R_m je modulační rychlost [Bd/s] a n je počet možných stavů v přenášeném signálu.

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

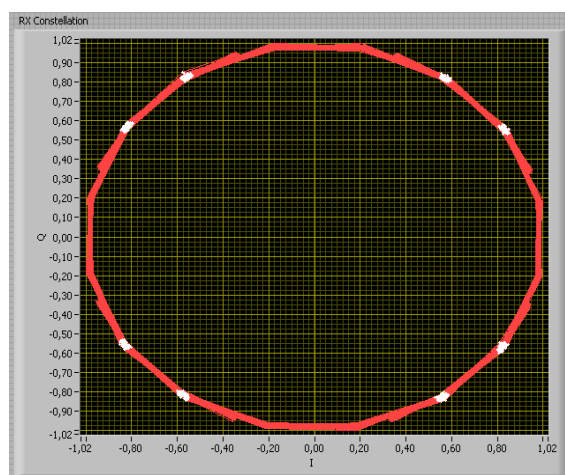
Jelikož platí, že šířka frekvenčního pásma je stále stejná, pak jediná možnost jak při dané šířce pásma přenést více informací je zvyšování počtu stavů modulačního schématu. Máme-li pouze dvojici různých stavů, je přenosová rychlost rovná modulační. V případě použití čtveřice různých stavů platí, že modulační rychlost je poloviční oproti rychlosti přenosové. [5]

2.9 Používané digitální modulace v telekomunikačních sítích

Tato diplomová práce se zabývá problematikou digitálních modulací. Jako první typ sítě s použitím digitální modulace v praxi se začala využívat síť GSM.

2.9.1 GSM (Global System for Mobile Communications)

V sítích druhé generace, tedy GSM, se používá modulace GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*). Tato modulace je odvozená od FSK (*Frequency Shift Keying*). Velkou nevýhodou je, že skoková změna fáze této modulace znamená potřebu relativně širokého frekvenčního pásma. Tuto nevýhodu odstraňuje modulace MSK. V této modulaci dochází ke spojitému přechodu fáze. Pokud se ale před modulátor předradí propust gaussovského typu (jedná se o dolní propust), pak se tedy jedná o modulaci GMSK. Gaussovský filtr zajišťuje kmitočtové omezení spektra vstupního signálu, který nemusí být již dále filtrován. Na obrázku (viz. Obr. 2. 4) vidíme konstelační diagram modulace GMSK. [7]

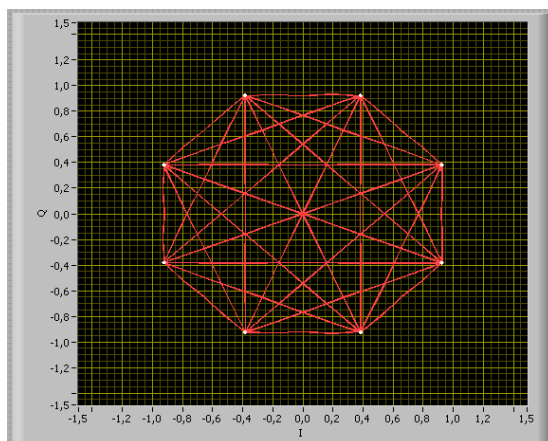


Obrázek 2.4: Vektorový diagram GMSK

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

2.9.2 EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution)

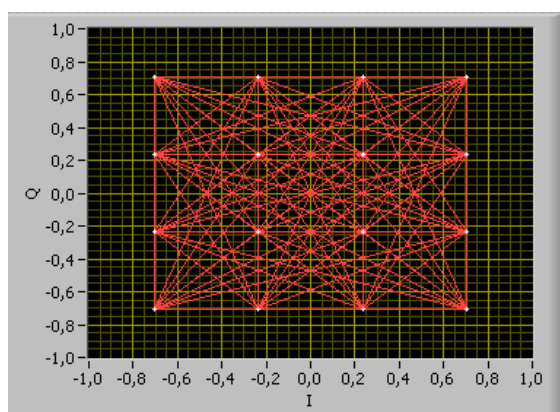
Navazuje na systém GSM. EDGE je zařazena do mobilních komunikačních systémů 2.5 generace. V systému EDGE se používá modulace 8-PSK, která umožnila zvýšení přenosové rychlosti na trojnásobek rychlosti modulační (viz. Obr. 2. 5).[7]



Obrázek 2.5: Vektorový diagram 8-PSK

2.9.3 UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)

Mobilní síť 3. generace (označované též jako systémy 3G) jsou implementovány do existujících mobilních sítí 2. generace. UMTS je zaměřen na multimediální služby a vysokorychlostní datové přenosy. Původní myšlenkou UMTS bylo nabídnout tuto službu tam, kde se koncentrují potenciální UMTS uživatelé, tedy ve velkých městech a v hustě obydlených oblastech. V této síti se používají modulace QAM a QPSK. Modulace QAM se začíná uplatňovat od pátého vydání standardu UMTS. Modulace QAM využívá dvou sinusových nosných průběhů s konstantním kmitočtem vzájemně posunutých o 90° . Obě nosné jsou nezávisle na sobě amplitudově klíčovány a poté sečteny. Výsledný signál je ovlivněn jak amplitudovým tak i fázovým posunem. Na obrázku (viz. Obr. 2. 6) vidíme vektorový diagram 16-QAM modulační schémata. Modulace QPSK byla popsána v kapitole EDGE (viz. Kap. 2.9.2). [7]



Obrázek 2.6: Vektorový diagram 16-QAM

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

2.10 Degradací vlivy signálu

Tato diplomová práce je orientována na generování digitálně modulovaných signálů. Výše uvedený popis představoval tyto signály v jejich ideální podobě, ovšem prostředky pro testování přijímačů těchto systémů musí být schopny tyto signály vygenerovat i v jejich reálné podobě a tedy zatížené chybami.

Příčin ztrát šíření může být celá řada: ztráty volným prostorem, difrakční ztráty vlivem zastínění překážkou, útlum atmosférickými plyny, ztráty rozptylem vlivem anomální refrakce, ztráty vícecestným šířením, ztráty vlivem scintilací, útlum hydrometeory (déšť, kroupy, atd.), ztráty vlivem změny úhlu odchodu a dopadu vlny, ztráty v ionosféře, atd. [8]

2.10.1 Vícecestné šíření

Při samotném šíření vlny prostorem, dochází k interakci vlny s atmosférou a zemským povrchem. Tento jev se souhrnně nazývá vícecestné šíření (multipath propagation), kdy se k přijímači šíří kromě přímé vlny i odrazem vlna druhotná, která se s přímou vlnou sčítá. Takovýchto odražených vln může být nekonečně mnoho. [8]

2.10.2 Úniky

Náhodnému kolísání útlumu mezi vysílačem a přijímačem způsobeným šířením vlny říkáme úniky (fading). Podle charakteru rozlišujeme různé dále specifikované typy úniků.

Pro hodnocení pevných spojů při nezastíněném šíření v atmosféře mluvíme o plochých a frekvenčně selektivních únicích. Ploché úniky způsobují konstantní útlum na celé šířce frekvenčního pásma daného přenosu, jejich změny jsou obvykle pomalé a nemá na ně vliv změna polohy antén. Frekvenčně selektivní úniky mají proměnlivý útlum vzhledem k frekvenčnímu pásmu přenosového kanálu. Příčinou těchto úniků je vícecestné šíření.

Pro mobilní spoje v zástavbě se mluví o pomalých a rychlých únicích. Pomalé úniky vznikají zastíněním spoje zástavbou. Z hlediska frekvenčního pásma se jedná o ploché úniky, ale počítá se s pohybem mobilní antény v zástavbě. Rychlé úniky mají frekvenčně selektivní charakter, jehož příčinou je vícecestné šíření. Obvykle jde o sčítání velkého množství paprsků přicházejících po různých dlouhých drahách.

Náhodné úniky lze vyhodnocovat pouze statistikou založenou na dlouhodobých měřeních daných jevů. [8]

2.10.3 Chyba amplitudy

Je to rozdíl mezi ideální velikostí amplitudy a velikostí amplitudy přijímaného I/Q signálu, vztaženo k pozici symbolů v konstelačním diagramu. Může se jednat o hodnotu pozitivní nebo negativní. Pozitivní hodnotu získáme, když dojde k zesílení amplitudy signálu. Negativní hodnotu při útlumu amplitudy signálu. Jednotkou měření je dB.

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

2.10.4 Rozdíl amplitud

Jedná se o rozdíl amplitud I a Q složky signálu. Způsobuje posun od ideálního bodu v konstelačním diagramu. Posun v horizontální rovině zapříčiňuje menší I amplituda než amplituda Q, posun ve vertikální rovině je zapříčiněn menší amplitudou Q než I.

2.10.5 Chyba fáze - Jitter, wander

Krátkodobé změny polohy signálových prvků u digitálního signálu se projevují jako chvění fáze. Jedná se o parazitní fázovou modulaci digitálního signálu. Krátkodobé změny polohy signálových prvků u digitálního signálu se projevují jako chvění fáze:

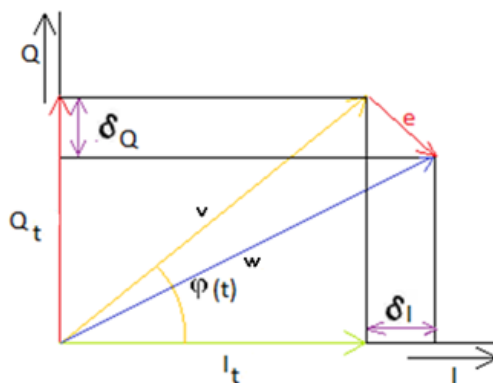
- pomalé ($f < 10$ Hz) – wander
- rychlé ($f \geq 10$ Hz) – jitter.

[9]

2.11 Měření parametrů digitální modulace

2.11.1 Modulační chyba - MER (Modulation Error Ratio)

Modulation Error Ratio je určena jako poměr součtu čtverců amplitud ideálních symbolových vektorů k součtu čtverců amplitud chybových symbolových vektorů. Výsledek je obvykle vyjádřen jako výkonový poměr v dB. Z obrázku (viz. Obr. 2.7): „e“ je chybový vektor, „v“ ideální symbolový vektor, „w“ přijatý symbolový vektor, „ $\varphi(t)$ “ fázový posuv, „ I_t “ ideální velikost složky I, „ Q_t “ ideální velikost složky Q, „ δI_t “ rozdíl velikostí přijaté složky I od ideální složky I a „ δQ_t “ rozdíl velikostí přichozí složky Q od ideální složky Q.



Obrázek 2.7: Modulační chyba a amplituda chybového vektoru

$$\frac{\sum I_t^2 + \sum Q_t^2}{\sum \delta I_t^2 + \sum \delta Q_t^2}$$

kde „ I_t “ je ideální velikost složky I, „ Q_t “ ideální velikost složky Q, „ δI_t “ rozdíl velikostí přijaté složky I od ideální složky I a „ δQ_t “ rozdíl velikostí přichozí složky Q od ideální složky Q. [10]

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

2.11.2 Amplituda chybového vektoru – EVM (Error Vector Magnitude)

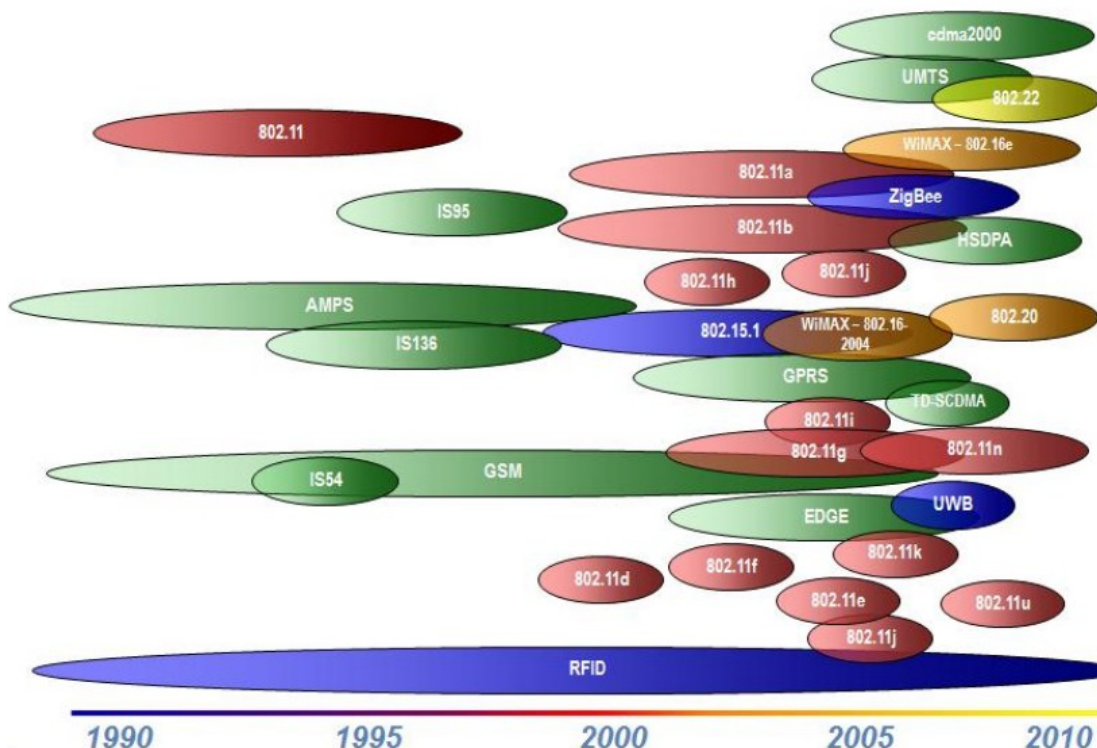
Princip určování Error Vector Magnitude (viz. Obr. 2.7) spočívá v porovnávání aktuálních naměřených hodnot amplitudy a fáze našeho signálu s průběžně vypočtenými referenčními hodnotami. Tyto referenční hodnoty mohou být předem spočítány na základě znalosti parametrů modulačního systému. Rozdíl mezi oběma fázory je základem pro měření amplitudy chybového vektoru.

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{I_{\text{akt}} - I_{\text{ideál}}}{I_{\text{ideál}}}$$

kde „ ΔI “ je rozdíl velikostí přijaté složky I od ideální složky I, „ ΔQ “ rozdíl velikostí příchozí složky Q od ideální složky Q a EVM je normalizováno podle $|v|$ [%]. [10]

3 Přístroje a nástroje pro generování digitálně modulovaných signálů. Srovnání klasické a virtuální instrumentace pro tuto aplikační oblast.

Pro generování signálu v reálném prostředí vzniká potřeba využít různé druhy přístrojů a nástrojů. Jedná se o přístroje klasické instrumentace (přístroje tak, jak je známe) nebo se jedná o přístroje a nástroje virtuální instrumentace (hlavní část přístroje tvoří program v počítači). Existuje mnoho různých druhů generátorů signálů, s různými účely a způsoby použití, ovšem ne každé zařízení je vhodné pro všechny možné aplikace či technologie. Na obrázku (viz. Obr. 3. 1) je demonstrován vývoj standardů v oblasti digitálních modulací.



Obrázek 3.1: Využívané bezdrátové standardy [6]

Trochu si přiblížíme potřebné parametry pro generátory signálů u některých moderních bezdrátových technologií. V této problematice je důležitý frekvenční rozsah kanálu dané technologie. S frekvencemi je nutné velmi pečlivě hospodařit tak, aby každý přenos měl k dispozici takovou šířku pásma (rozsah frekvencí), jakou potřebuje, ale nedocházelo k nežádoucímu ovlivňování jednoho přenosu jinými přenosy, které by mohly používat stejná nebo blízká frekvenční pásma. [6,12]

- **GSM** (Global System for Mobile communications) technologie využívá tři pásma 900/1800/1900MHz s šířkou kanálu 200kHz.
- **Wi-Fi** pracuje v pásmu 2,4GHz a 5GHz. Tím, že jsou tato pásma bezlicenční, provádí v něm komunikaci mnoho dalších zařízení. Ať už se jedná o Wi-Fi a nebo o Bluetooth, některé bezdrátové telefony či počítačové periferie.

Přístroje a nástroje pro generování digitálně modulovaných signálů. Srovnání klasické a virtuální instrumentace pro tuto aplikační oblast.

- **GPRS** (General Packet Radio Service) je realizována přenosem signálu v síti GSM určenou pro mobilní telefony v Evropě na frekvencích 900/1800 MHz.
- **EDGE** (Enhanced Data rates for Global Evolution)
- **Zigbee** pracuje v bezlicenčních pásmech buď 902–928 MHz a hlavně 2,4 GHz.
- **UMTS** má šířku kanálu 5 MHz

3.1 Klasická instrumentace

První analogové měřicí přístroje ještě nebyly vybaveny komunikačním rozhraním. U těchto přístrojů definoval funkce přístroje jednoznačně jen výrobce přístroje. Koncový uživatel poté může pouze využít tyto funkce, které jsou v přístroji implementovány. Také u těchto typů měřicích přístrojů mohlo dojít k chybě „lidského faktoru“ při opisování dat z obrazovky přístroje.

Dalším typem měřicích přístrojů byly přístroje vybavené komunikačním rozhraním. Komunikační rozhraní bylo do přístrojů implementováno kvůli možnosti komunikaci přístroje s počítačem a vyloučení chyby lidského faktoru. [12]

3.2 Rozdělení přístrojů

Hlavní rozdělení přístrojů v této oblasti je na generátory a analyzátory. V této kapitole se budeme zabývat jen přístroji potřebnými pro generování signálu, tedy generátory. Pomocí generátoru můžeme ověřit, zda přijímač nebo některá z jeho částí správně vyhodnocuje signál generovaný generátorem.

3.3 Generátory signálu

Jedná se o zdroje střídavého periodického signálu. Součástí každého generátoru je oscilátor. U těchto typů přístrojů lze měnit tvar a průběh vysílaného signálu v závislosti na požadavcích uživatele. Existuje mnoho různých druhů generátorů signálů, s různými účely a možnostmi aplikace. Ne každé zařízení je vhodné pro všechny možné aplikace. Nejdůležitější parametry generátorů signálu jsou:

- frekvenční stálost a přesnost (udávaná za dobu 24 hodin a 1rok),
- veliký frekvenční rozsah,
- definované a přesné výstupní napětí,
- definovatelná výstupní impedance,
- větší množství různých generovaných průběhů,
- spektrální čistota.

Rozeznáváme tyto základní druhy generátorů:

- funkční generátory,
- generátory libovolných průběhů,
- generátory pro speciální účely,
- RF (Radio-frequency) a mikrovlnné generátory signálů (generátory analogového signálu, generátory vektorového signálu a generátory logického signálu).

[11,13]

Přístroje a nástroje pro generování digitálně modulovaných signálů. Srovnání klasické a virtuální instrumentace pro tuto aplikační oblast.

3.3.1 Funkční generátory (Function generators)

Funkční generátor je zařízení, které produkuje jednoduché opakované průběhy. Taková zařízení obsahují elektronický oscilátor, obvod, který je schopen vytvořit opakující se průběh.

Nejběžnější průběh u těchto generátorů je sinusový. Pokud oscilátor pracuje nad audio frekvenčním rozsahem (> 20 kHz), obsahuje generátor velmi často nějakou funkci modulace jako amplitudovou modulaci (AM), frekvenční modulaci (FM), nebo fázovou modulaci (PM). [11]

3.3.2 Generátory libovolných průběhů

AWG (arbitrary waveform generator) nebo-li generátory libovolných průběhů jsou sofistikované generátory signálů, které umožňují uživateli vytvářet libovolné průběhy signálů v určitém kmitočtovém rozsahu. Vzorkovací kmitočet je u těchto generátorů proměnný. Jednotliví výrobci generátorů k nim nabízejí software, kterým lze definovat výstupní průběhy generátorů. Nevýhodou těchto programů je však skutečnost, že množina definovatelných průběhů je více či méně omezena. [11]

3.3.3 RF a mikrovlnné generátory signálů (radio frequency)

RF (radio frequency) a mikrovlnné generátory signálů se používají pro testování komponent, přijímače a zkušební systémy v široké škále aplikací, jako jsou mobilní komunikace, síť WiFi, GPS, satelitní komunikace, radary a podobně. RF a mikrovlnné generátory signálů obvykle mají podobné vlastnosti a schopnosti, ale jsou rozděleny podle frekvenčního rozsahu. Frekvenční rozsah může u RF generátorů signálů typicky sahát od několika kHz do 6 GHz, zatímco generátory mikrovlnného signálu mohou pokrýt mnohem širší frekvenční rozsah, od méně než 1 MHz alespoň 20 GHz. Některé modely se vyšplhají až na 70 GHz s přímým koaxiálním výstupem, a až stovky GHz při použití externích modulů zdroje. RF a mikrovlnné generátory signálů mohou být klasifikovány dále jako analogové generátory, generátory logického signálu a generátory vektorových signálů.

Generátory analogového signálu

Analogové signální generátory založené na sinusovém oscilátoru byly a jsou stále používány. V minulosti se rozdělovaly tyto generátory podle účelu a designu na radio-frekvenční (RF) a audio-frekvenčních generátory signálů. Podrobněji budou popsány pouze RF generátory.

Radio-frekvenční analogové generátory (RF)

RF generátory signálu jsou schopny produkovat CW (continuous wave -nepřetržitá vlna) tóny. Výstupní frekvence může být naladěna na jakoukoliv frekvenci v jejich frekvenčním rozsahu. Těchto typů generátorů vzniká velké množství a používají různé druhy analogových modulací. Dalším společným rysem těchto generátorů je vestavěný útlumový článek (atenuátor), díky kterému může měnit výstupní výkon generátoru. Široká škála výstupního výkonu je žádoucí, protože různé aplikace vyžadují různou velikost výkonu signálu.

Generátory logického signálu (generátor vzoru dat)

Tento druh generátorů signálů produkuje logické typy signálů - to je logika 1 a 0 ve formě konvenčních napěťových úrovní. [13]

Přístroje a nástroje pro generování digitálně modulovaných signálů. Srovnání klasické a virtuální instrumentace pro tuto aplikační oblast.

3.3.4 Generátory vektorového signálu (Vector Signal Generators)

Pro generování signálů v digitálních komunikačních systémech a pro jejich testování vzniká potřeba využívat generátory vektorového signálu. Klasické přístroje, již u moderních digitálních systémů, nelze využít. Tyto generátory jsou schopny generovat digitálně modulované rádiové signály, které mohou využívat velké množství digitálních modulačních schémat, jako QAM, QPSK, FSK, PAM atd. Důležité parametry pro generátory vektorového signálu:

- frekvenční rozsah,
- schopnost generovat harmonické a rušivé signály,
- výkon na výstupu generátoru,
- definované a přesné výstupní napětí,
- fázový šum,
- podporované modulační schémata,
- kalibrační interval.

[13]

3.4 Virtuální instrumentace

Virtuální instrumentace nahlíží na měřicí přístroje z jiného úhlu. Jedná se o to, že se snaží doplnit personální počítač o prvky, tak aby počítač mohl pracovat jako měřicí přístroj. Pro naplnění myšlenky je nutno dovybavit počítač zásuvnými prvky, které plní funkce určená pro měření. Z tohoto důvodu vzniklo PXI (PCI Extensions for Instrumentation). PXI představuje otevřenou specifikaci komunikační sběrnice. Pro toto rozhraní PXI je v současné době možnost výběru ze široké škály modulů sloužících pro měření, generování signálu, VF techniku a další. V dnešní době se také vyvíjí sběrnice PXI Express, což je rozšířená verze specifikace PXI. U virtuálních přístrojů je nedůležitější jejich variabilita. Při použití jiné měřicí karty může přístroj sloužit pro jiné měřicí účely. Základ tohoto systému tvoří tři základní komponenty - skříň, systémový kontrolér a zásuvné moduly.

Skříň tvoří kostru systému a obsahuje výkonný propojovací systém PXI se sběrnicemi.

Systémový kontrolér se vyrábí nejčastěji ve variantách PXI a MXI. Varianta PXI představuje kompletní systém, ke kterému již není nutné využívat PC. Varianta MXI slouží pro komunikaci skrze váš počítač prostřednictvím software.

Zásuvné moduly - pro PXI sběrnici již existuje více než 1500 modulů a měřících karet. Pomocí zásuvných modulů můžeme vytvořit širokou škálu aplikací pro různá měření. Uživatelé si mohou vybrat z této široké řady modulů a mají tak možnost postavit si flexibilní testovací systémy, které lze snadno přizpůsobit pro splnění v podstatě jakýchkoli požadavků.

V této diplomové práci budou využity moduly „Generátor libovolných průběhů (Arbitrary Waveform Generator)“ (PXI-5421) a „Upconverter“ (PXI-5610). S využitím modulů digitálního upkonvertoru a generátoru lze generovat signál s šířkou frekvenčního pásma do 20 MHz s nosnou frekvencí od 250 kHz až 2,7 GHz, signál s libovolným modulačním schématem – např.: AM, FM, PM, ASK, FSK, MSK, GMSK, PSK, QPSK, PAM a QAM.

Velmi důležitá je také softwarová část virtuální instrumentace. Uživatel sám si může pro své měřicí karty vytvořit software, kterým zařízení ovládá. Tento software tedy zastupuje firmware

Přístroje a nástroje pro generování digitálně modulovaných signálů. Srovnání klasické a virtuální instrumentace pro tuto aplikační oblast.

měřicího přístroje a plní veškeré funkce měřicího přístroje v souladu s potřebami koncového uživatele. Klíčovou součástí měřicího programu je grafické uživatelské rozhraní, které obsahuje ovládací a indikační prvky podobné těm jako u klasické instrumentace.

Pro účel vytváření software pro dané měření slouží grafické vývojové prostředí LabVIEW. LabVIEW jako komplexní nástroj slouží pro vývoj kompletního systému. Systém pak zajišťuje řízení celého procesu sběru naměřených dat. V neposlední řadě dále pak jejich analýzu a samozřejmě i prezentaci získaných výsledků v podobě nejrůznějších výstupů (grafických, zvukových apod.).

Pro účely této práce použijeme rozšíření prostředí LabVIEW o knihovnu Modulation Toolkit. Knihovna Modulation Toolkit mimo jiné umožňuje:

- generování modulovaného signálu podle dosud známých standardů nebo podle uživatelské definice,
- standardní typy vizualizace výsledků měření (Eye diagram, konstelační diagram),
- analýza modulace,
- zhoršení signálu,
- ekvalizace, kódování kanálu, model kanálu,
- kódy pro realizaci modulací,
- většina měřených a vyhodnocovaných parametrů je k dispozici jako hotové příklady.

[6,12,14]

3.5 Porovnání klasické a virtuální instrumentace

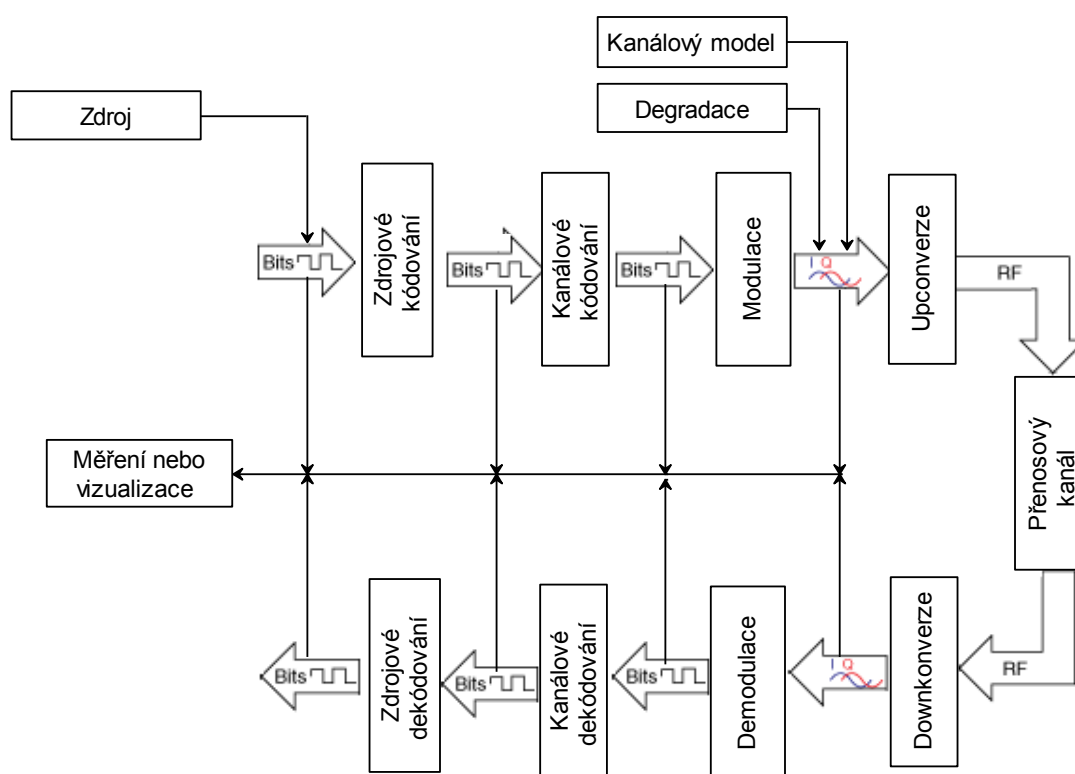
Tabulka 3.1: Porovnání klasické a virtuální instrumentace

Klasický přístroj	Virtuální přístroj
funkce definuje pevně výrobce	funkce definuje uživatel
Hlavní částí je hardware	Hlavní částí je software
pořizovací náklady jsou vysoké	pořizovací náklady jsou nižší
uzavřená architektura, minimální modifikovatelnost funkcí	otevřená architektura, možnost modifikovat program a změnit zásuvné karty

[12]

4 Blokové schéma pro generování digitálně modulovaného signálu a jeho implementace do grafického vývojového prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit.

K umožnění bezdrátového přenosu informace od vysílače k přijímači musí signál projít přes celý přenosový řetězec. V řadě aplikací v praxi se funkce jednotlivých bloků pro různé přenosové systémy mění, ale princip fungování řetězce je stále stejný. Na blokovém diagramu (viz. Obr. 4.1) vidíme základní stavební kameny přenosového digitálního řetězce. Z diagramu a následného popisu bloků lze pochopit, co se děje se signálem při přenosu od vysílače k přijímači.



Obrázek 4.1: Blokové schéma digitálního přenosového řetězce [15]

Zdroj signálu

Na vstupu vysílací části je zdroj signálu, jímž může být například mikrofón, televizní snímací elektronika a podobně. Ten přeměňuje přenášenou informaci na elektrický signál (je-li potřeba).

Zdrojové kódování

V této části přenosového řetězce se data digitalizují (pokud již nebyli digitalizovány), poté se zbavují data redundance, tedy nadbytečných informací pro přenos dat z důvodu malé kapacity přenosového kanálu. Tento děj se uskutečňuje pomocí vhodných algoritmů, filtrů a kódů. Nejčastěji se používá bezztrátová nebo ztrátová komprese. Opakem kodéru zdroje je dekodér zdroje.

Blokové schéma pro generování digitálně modulovaného signálu a jeho implementace do grafického vývojového prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit.

Kanálové kódování

V tomto bloku se vytváří kódování. Jeho cílem je tedy zabezpečit signál proti chybám vznikajícím při přenosu signálu v komunikačním kanálu. Chyby jsou obvykle způsobeny šumem, únikem signálu, odrazy a podobně.

Modulace

Dalším blokem se signál moduluje pomocí některého digitálního modulačního způsobu na nosnou vlnu, nacházející se buď v mikrovlnných, nebo vysokofrekvenčních pásmech (RF). Pod pojmem RF si obecně můžeme představit všechna pásma nad základním pásmem. Modulace je obecně definována jako proces, při němž se mění v rytmu modulačního signálu amplituda, frekvence nebo fáze nosné vlny.

Upkonverze

Jedná se o vysílání dat na frekvenci dle zvolené přenosové technologie. Konvertuje signál na vyšší frekvenci, než byla původní frekvence. V některých blokových schématech je upkonvertor součástí modulátoru.

Přenosový kanál

Přenosový kanál obsahuje souhrn prostředků, které vytvářejí cestu pro přenos informací mezi uživateli, jako například metalické vodiče nebo optické vodiče a technické prvky jako zesilovače. Hlavní charakteristickou vlastností je šířka pásma přenosového kanálu, dále přenosovou rychlostí, úrovní šumu, chybovostí a další.

Downkonverze

Je opakem upkonvertoru. Konvertuje signál na nižší frekvenci, než byla původní frekvence. V některých blokových schématech je downkonvertor součástí demodulátoru.

Demodulace

Převádí přijímaný vysokofrekvenční signál (mikrovlnný) na modulační signál, nacházející se v základním pásmu.

Kanálové dekódování

Na základě znalosti algoritmu kanálového kódování provádí rekonstrukci originálního signálu.

Zdrojové dekódování

Realizuje inverzní operace vůči kodéru zdroje.

[15,16]

4.1 Návrh systému digitálního přenosového řetězce pro bezdrátový přenos dat vysílací část

V případě použití virtuální instrumentace je nutno vytvořit softwarovou (programovou) část pro zvolené aplikace. Tento software (program) musí uživatel přesně definovat a tvoří rozhraní mezi přístrojem a uživatelem. V minulosti se naráželo na problém, že vytváření takového programu bylo velmi časově náročné a také uživatel musel detailně znát hardwarové řešení přenosového řetězce, pro který chtěl program vytvářet. Bylo nutné definovat všechny funkce pro podporu jednotlivých rozhraní. Z těchto důvodů se začalo využívat a také hojně rozšiřovat grafické programování. Vývojová prostředí tedy v sobě obvykle integrují mnoho nástrojů pro automatizaci tvorby softwarové aplikace. Aplikaci tedy vytváříme pomocí bloků, které reprezentují určitou část přenosového řetězce. Propojení jednotlivých bloků získáváme zdrojovou podobu programu. Tyto bloky jsou obsaženy v knihovnách, jako je např. Modulation Toolkit pro grafické vývojové prostředí LabVIEW.

4.1.1 Nahrazení vysílací části blokového diagramu v prostředí LabVIEW s použitím knihovny Modulation Toolkit.

The block diagram illustrates the architecture of a PSK transmitter. It begins with a "pulse shaping filter" block, which outputs a signal to a multiplier (\times). The input to the multiplier also comes from an "M-PSK" block, which has a dropdown menu set to "132". A constant value of "60" is also fed into the multiplier. The output of the multiplier passes through a "PSK (M)" block, which has a dropdown menu set to "PSK (M)". This block's output goes to a "PN Order" block, which has a dropdown menu set to "PN Order". The output of the "PN Order" block is then fed into a "PSK" block, which has a dropdown menu set to "PSK". Finally, the output of the "PSK" block is sent to a "PSK 011" block, which has a dropdown menu set to "PSK 011". The final output of the transmitter is shown as a waveform.

21

Blokové schéma pro generování digitálně modulovaného signálu a jeho implementace do grafického vývojového prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit.

První blok má název “Generate System Parameters” (viz. Obr. 4.3). Přiřazuje každému stavu jeho binární hodnotu podle zvoleného modulačního schématu. V praktické části své diplomové práce generuji digitálně modulovaný signál podle QPSK schématu, proto je nutné v tomto bloku zvolit polymorfnní instanci PSK (M).



Obrázek 4.3: blok „Generate System Parameters“

Druhý blok s názvem "MT Bit Generation" (viz. Obr. 4.4) slouží pro generování digitálního bitového toku, který později bude modulován za pomoci modulačního schématu QPSK.



Obrázek 4.4: blok "MT Bit Generation"

Další blok s názvem “Generate Filter Coefficients“ (viz. Obr. 4.5) slouží pro definování parametrů filtru, který je využit při modulaci k redukci šířky pásma modulovaného signálu.



Obrázek 4.5: blok “Generate Filter Coefficients”

Následující blok „Modulate PSK“ (viz. Obr. 4.6) vykonává PSK modulaci na vstupním bitovém toku podle parametrů na vstupu „system parameters“ a „filter coefficients“. Oba tyto parametry jsou získány z předchozích VI.

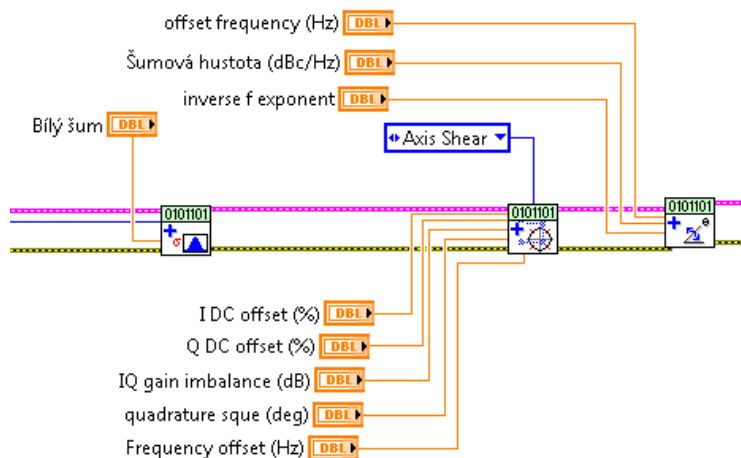


Obrázek 4.6: blok “Modulate PSK”

Tyto čtyři základní bloky vytváří digitálně modulovaný signál s možností použití filtru.

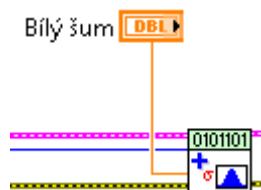
Blokové schéma pro generování digitálně modulovaného signálu a jeho implementace do grafického vývojového prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit.

Dále je zde nutné zmínit bloky, které simulují podmínky v reálném přenosovém kanálu (viz. Obr. 4.7).



Obrázek 4.7: blok pro simulaci reálných podmínek přenosového kanálu

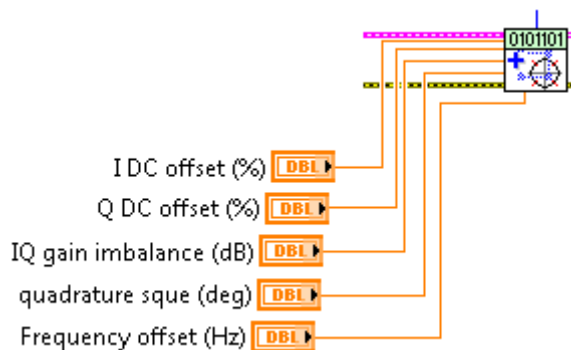
V bloku "Add AWGN" (viz. Obr. 4.8) je modulovaný signál vystaven působení „Additive White Noise Gaussian“, tedy v překladu bílého gaussovského šumu na základě vstupní hodnoty v tomto VI pojmenované jako „Bílý šum“ [Eb/N0].



Obrázek 4.8: blok "Add AWGN"

Dalším blokem, který simuluje reálný přenosový kanál je „apply IQ impairments“ (viz. Obr.4.9). Zde lze nastavit některé vlastnosti modulátoru, jako jsou: zbytková nosná, nerovnováha

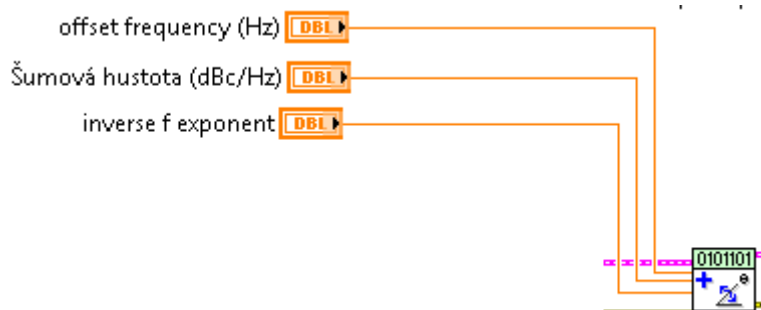
I a Q kanálů, kvadrurní chyba a nelinearita I/Q modulátoru.



Obrázek 4.9: blok "apply IQ Impairments"

Blokové schéma pro generování digitálně modulovaného signálu a jeho implementace do grafického vývojového prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit.

Posledním blokem, který simuluje podmínky v reálném přenosovém kanálu je blok „Add Phase noise“ (viz. Obr. 4.10). V tomto bloku je k signálu přidáván „Phase noise“, tedy fázový šum podle vstupních parametrů.



Obrázek 4.10: blok „Add Phase noise“

5 Návrh a implementace aplikace pro generování digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového generátoru na bázi PXI modulárního systému.

V této kapitole je popsán návrh a implementace aplikace pro generování digitálně modulovaného signálu za pomoci grafického vývojového prostředí LabVIEW a při využití knihovny Modulation Toolkit. Funkčnost aplikace byla přizpůsobena reálnému hardwaru od firmy National Instruments na bázi PXI modulárního systému. Tedy přesněji přístroji s označením NI PXI-5700.

Z principu fungování grafického vývojového prostředí se samotná aplikace dělí na dvě základní části: čelní panel a blokový diagram.

Blokový diagram je část programu, která umožňuje vývoj samotné aplikace pomocí grafického programování a je principiálně složen ze základních funkčních bloků uvedených v kapitole 4 (viz. Kap. 4).

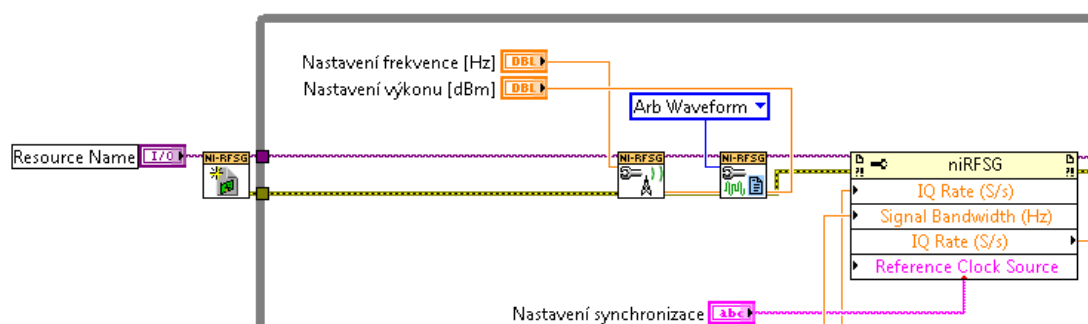
Čelní panel je část programu sloužící jako uživatelské prostředí.

5.1 Tvorba blokového diagramu

Nejprve se budeme zabývat částí tvorby samotného blokového diagramu.

5.1.1 Blok pro nastavení základních parametrů

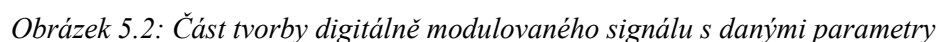
V první části mé aplikace (viz. Obr. 5.1) nejprve dochází k výběru portu, na kterém dané zařízení reálně pracuje (niRFSG Initialize VI). Dále zde dochází k nastavení základních parametrů frekvence a výkonu (niRFSG Configure RF VI) a také k výběru módu generování, pro mou aplikaci se jedná o „Arbitrary Waveform“, tedy generování libovolného průběhu (niRSFG Configure Generation Mode VI). V další části dochází k výpočtu vzorkovací frekvence.



Obrázek 5.1: Část nastavení parametrů a výpočtu vzorkovací frekvence

5.1.2 Blok tvorby digitálně modulovaného signálu

V tomto bloku (viz. Obr. 5.2) vytvářím digitálně modulovaný signál podle uživatelem zadaných parametrů. Zadávané parametry jsou: parametry filtru (koeficient alfa, typ filtru a délka filtru) a počet vzorků na symbol u modulační QPSK.



Tato část programu (viz. Obr. 5.3) simuluje podmínky v reálném přenosovém kanálu. Skládá se z bloků:

-

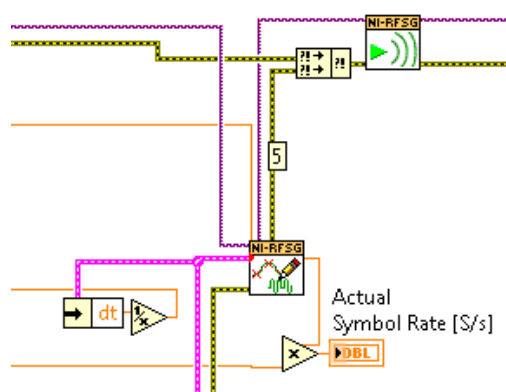
26

Návrh a implementace aplikace pro generování digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového generátoru na bázi PXI modulárního systému.

5.1.4 Blok pro zahájení generování signálu

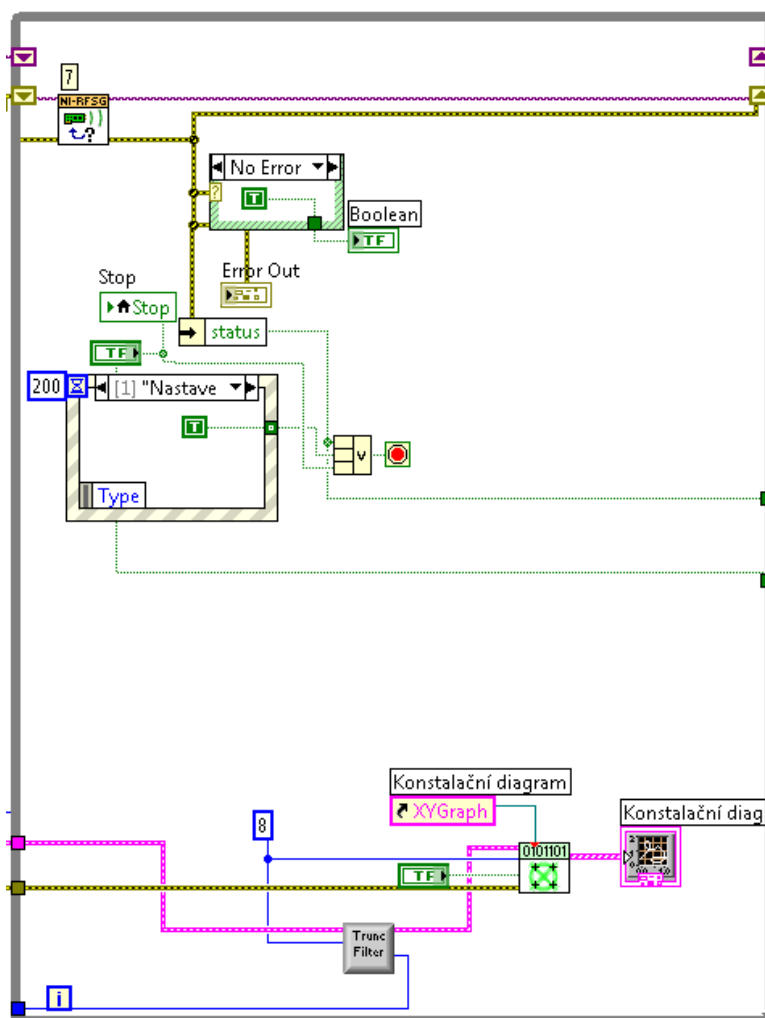
V bloku „RFSG resample and write“ (viz. Obr. 5.4) se převzorkovává komplexní signál na novou vzorkovací frekvenci a zapisuje signál do paměti zařízení. Přitom je zajištěno, že fáze signálu zůstane stejná.

V další části je blok „niRFSG Initiate VI“ (viz. Obr. 5.4), který zahájí generování signálu, což způsobuje, že zařízení opustí konfigurační stav a přejde do stavu generování signálu.

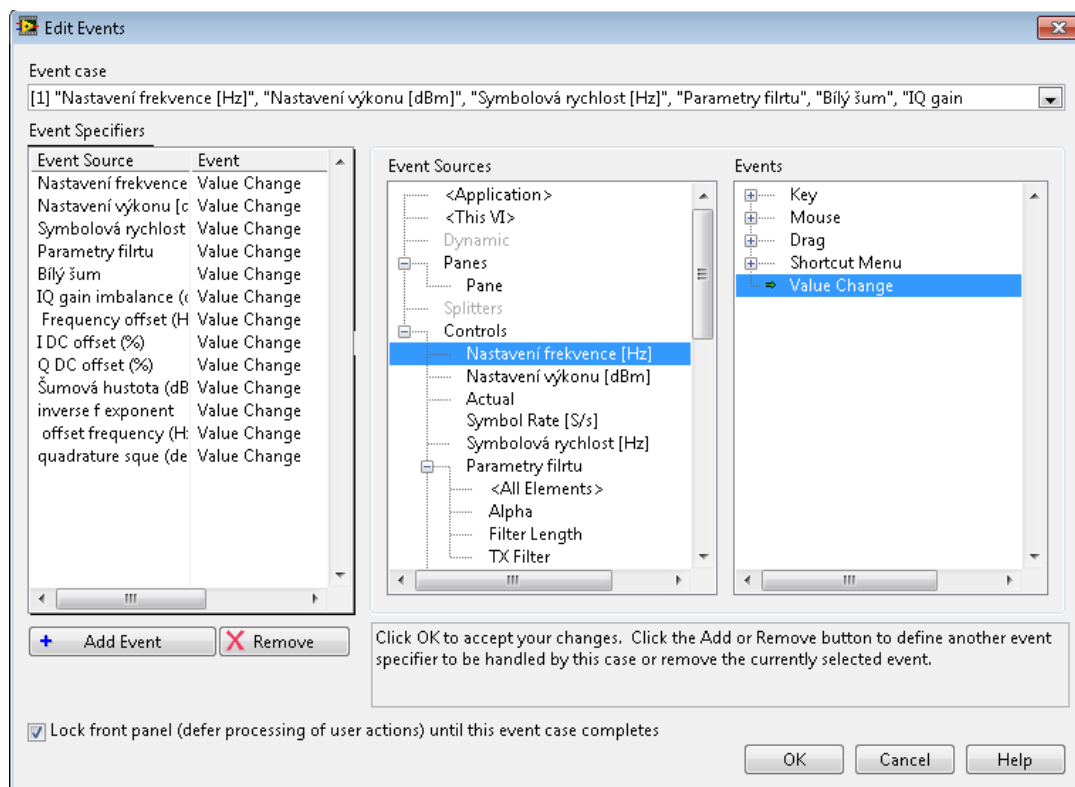


Obrázek 5.4: Část zahájení generování signálu

- stiskem tlačítka STOP,
- změnou parametru generovaného signálu, všechny parametry, které způsobí zastavení cyklu, jsou uvedeny v obrázku (viz. Obr. 5.6),
- chybou vzniklou při generování. Kontrolu potencionální chyby při generování zajišťuje blok „Check generation status“.



Další funkce tohoto bloku je zobrazování konstelačního diagramu digitálně modulovaného signálu.

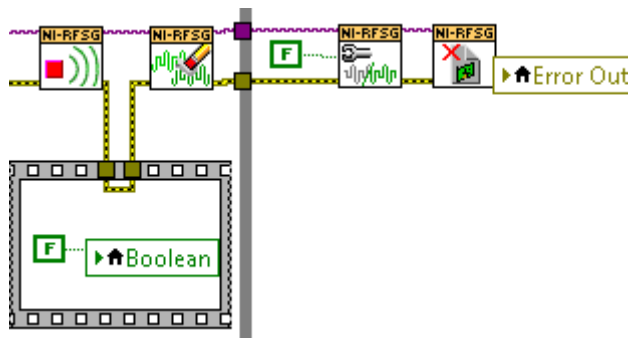


Obrázek 5.6: Parametry pro zastavení vnitřního cyklu

5.1.6 Blok ukončení generování

Poslední část mého programu (viz. Obr. 5.7) obsahuje čtyři základní bloky a to:

- „niRFSG Abort VI“ zastavuje generování signálu a způsobuje přechod generátoru do konfiguračního stavu,
- „niRFSG Clear All Arb Waveforms VI“ odstraní všechny současné definice křivek a všechny skripty. Zařízení musí být v konfiguračním stavu před zavoláním tohoto VI.
- „niRFSG Configure Output Enabled VI“ zakáže nebo povolí signálový výstup. V mém programu pouze zakazuje výstup,
- „niRFSG Close VI“ zruší jakékoliv generování signálu a ukončí ovládací relaci.

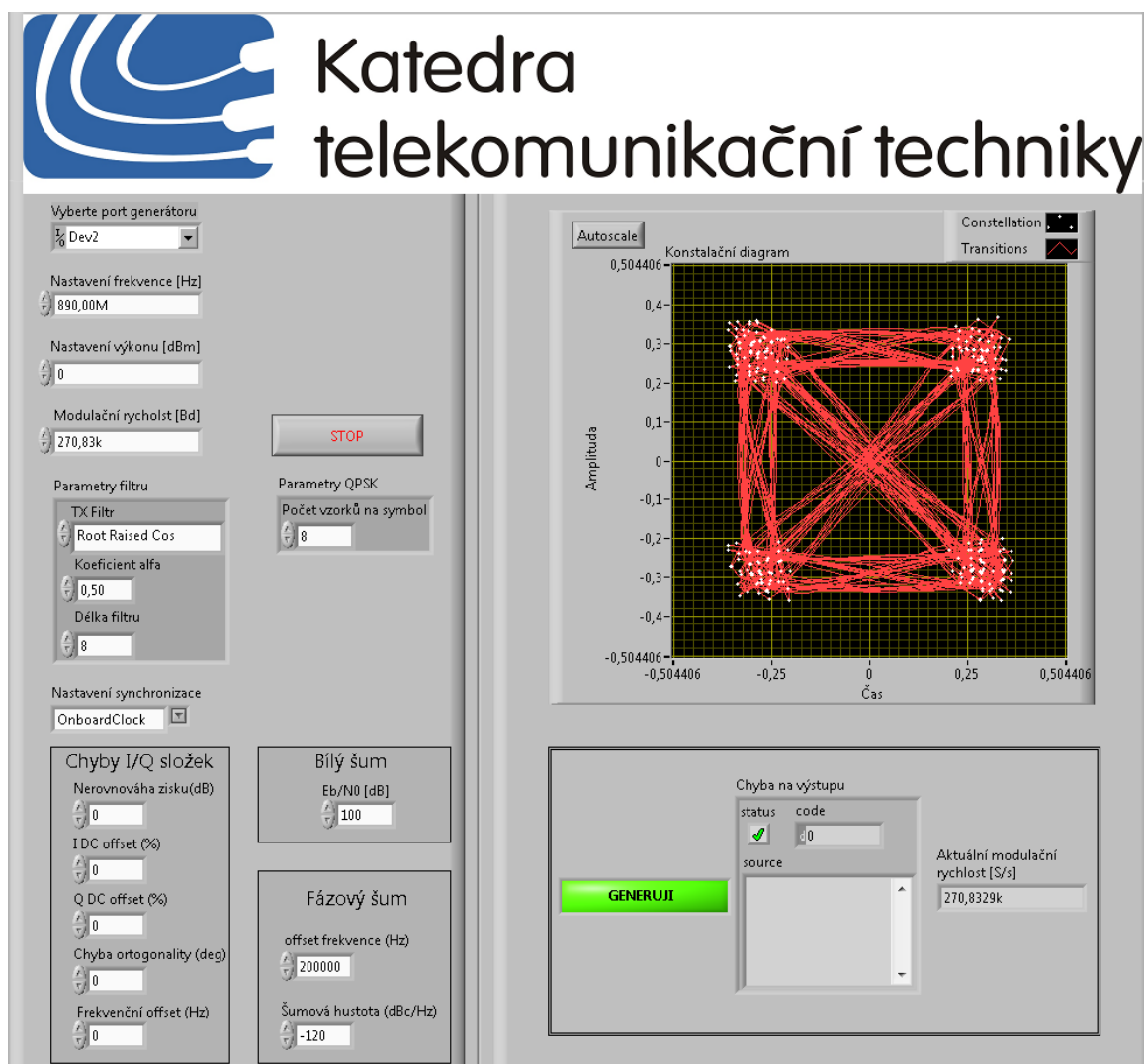


Obrázek 5.7: Část ukončení generování signálu

Návrh a implementace aplikace pro generování digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového generátoru na bázi PXI modulárního systému.

5.2 Popis uživatelského rozhraní

V této části se budu zabývat popisem uživatelského rozhraní mého programu (viz. Obr. 5.8), ovládacími prvky a jednotlivými parametry, které můžeme definovat při generování digitálně modulovaného signálu.



Obrázek 5.8: Uživatelské rozhraní

Návrh a implementace aplikace pro generování digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového generátoru na bázi PXI modulárního systému.

5.2.1 Část pro nastavení parametrů generování

V první části uživatelského prostředí (viz. Obr. 5.9) může uživatel nastavit jednotlivé parametry pro generování digitálně modulovaného signálu a také parametry pro správnou funkci běhu programu.

Vyberte port generátoru - touto volbou uživatel definuje port připojeného zařízení, v mém případě se jedná o port Dev2.

Nastavení frekvence [Hz] - uživatel volí frekvenci, na které bude generátor vysílat v Hz.

Nastavení výkonu [dBm] - jedná se o nastavení výstupního výkonu generátoru v dBm (jednotka dBm je zkratka pro poměr výkonu k jednomu mW).

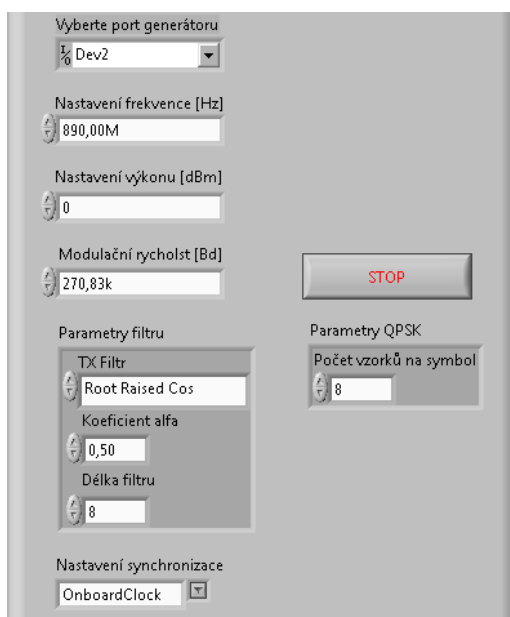
Modulační rychlost [Bd] - nastavuje počet symbolů přenesených za sekundu, je to rychlost, se kterou se mění jednotlivé stavy nosné.

Parametry filtru - uživatel zvolí typ použitého filtru a jeho parametry, filtr se používá pro zúžení potřebného frekvenčního pásma.

Nastavení synchronizace - slouží pro nastavení typu synchronizace s ostatními přístroji.

QPSK system parameters - obsahuje proměnou počet vzorků na symbol, která určuje kolik vzorků reprezentuje jeden konkrétní stav.

Tlačítko STOP - zastaví běh programu a ukončí generování signálu.



Obrázek 5.9: Část pro nastavení parametrů generování

5.2.2 Část pro simulaci reálných podmínek přenosového kanálu

Ve druhé části je možné nastavit parametry pro simulování podmínek reálného přenosového kanálu (viz. Obr. 5.10).

Chyby I/Q složek:

- Nerovnováha zisku (IQ gain imbalance) [dB] - určuje požadovaný poměr zisku I složky k zisku Q složky, platné hodnoty se pohybují v rozmezí od -6,0 do +6,0 dB, výchozí hodnota je 0.0 dB.
- I DC offset [%] - určuje požadovaný DC offset na průběhu I složky v celém vstupním komplexním průběhu v procentech, platné hodnoty jsou mezi -100,0 a +100,0 procenty.
- Q DC offset[%] - určuje požadovaný DC offset na průběhu Q složky v celém vstupním komplexním průběhu v procentech, platné hodnoty jsou mezi -100,0 a +100,0 procenty.
- Chyba ortogonality (quadrature skew) [deg] - určuje požadované kvadraturní zkosení komplexní křivky ve stupních, platné hodnoty jsou mezi -30,0 a +30,0 stupni, výchozí hodnota je 0.0 stupňů.
- Frekvenční offset [Hz] - určuje požadovanou frekvenční odchylku výstupní komplexní křivky v Hz, výchozí hodnota je 0.0 Hz.

Bílý šum:

- Eb/N0 [dB] - určuje — na výstupu komplexní křivky v dB, standardně se tato hodnota pohybuje v reálných podmínkách okolo 10,0 dB, — je poměr energie bitu k šumové hustotě spektra.

Fázový šum:

- Offset frekvence [Hz] - určuje offset frekvenci v Hz pro zadanou hustotu šumu, platné hodnoty tohoto parametru musí být v rozsahu 0,7 MHz až —, kde — je vzorkovací frekvence, výchozí hodnota je 200,000 Hz (200 kHz).
- Šumová hustota [dBc/Hz] - určuje příspěvek šumu v postranním pásmu při šířce pásma 1Hz vztaženo k celkovému výkonu na zadané offset frekvenci, výchozí hodnota je -120 dBc / Hz.

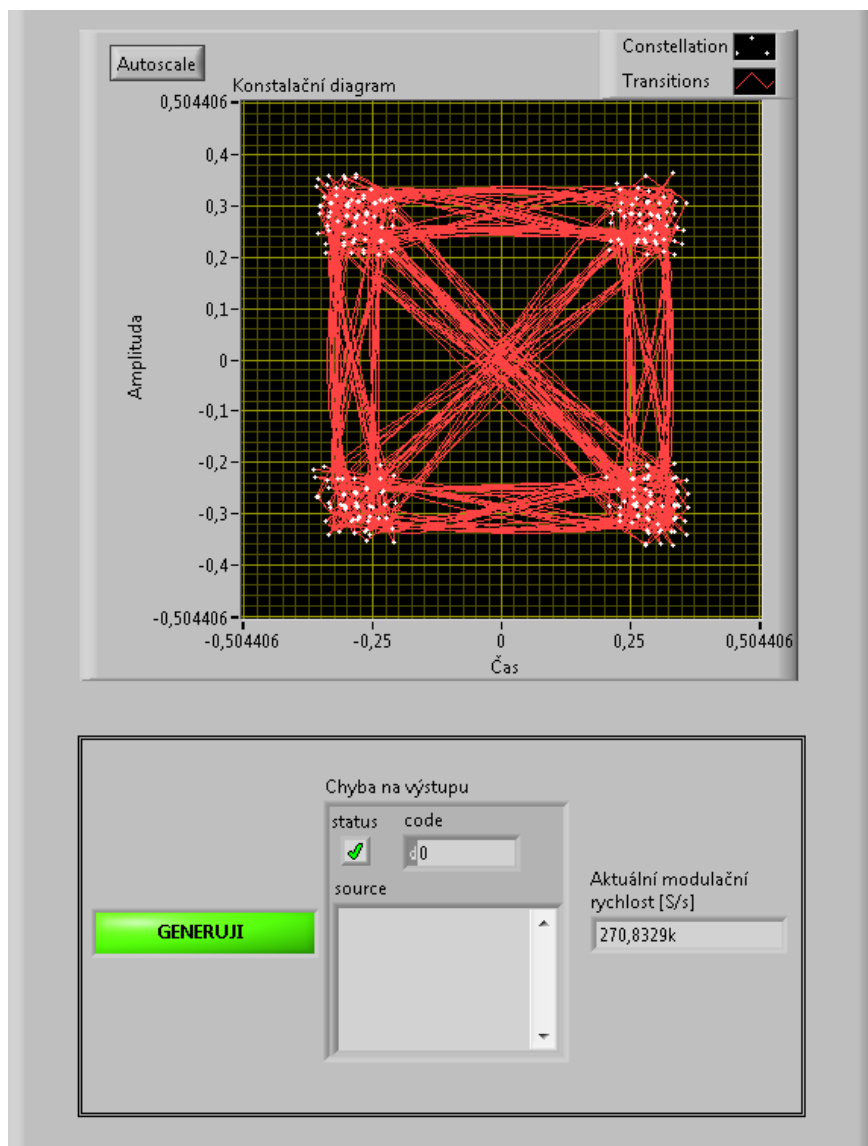
Chyby I/Q složek	Bílý šum	Fázový šum
Nerovnováha zisku(dB)	Eb/N0 [dB]	
0	100	
I DC offset (%)		
0		
Q DC offset (%)		
0		
Chyba ortogonality (deg)		
0		
Frekvenční offset (Hz)		
0		
		offset frekvence (Hz)
		200000
		Šumová hustota (dBc/Hz)
		-150

Obrázek 5.10: Část určená pro simulaci reálných podmínek přenosového kanálu

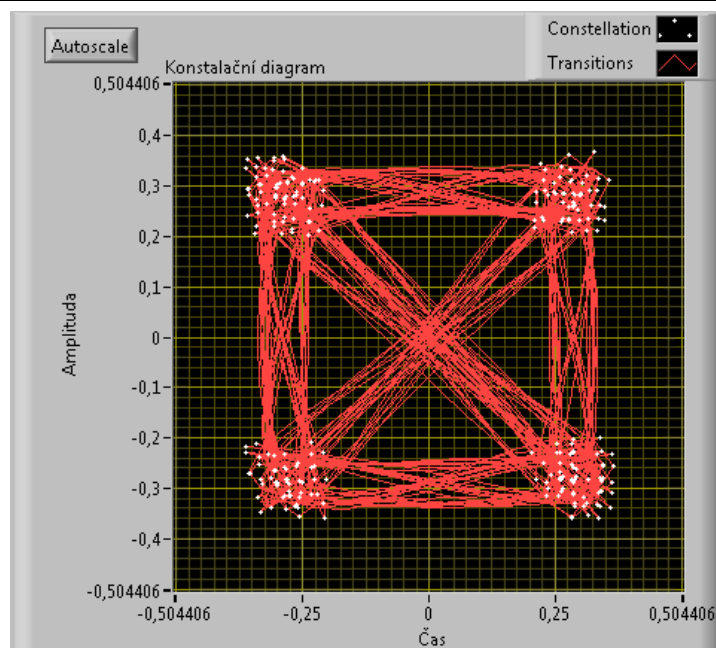
Návrh a implementace aplikace pro generování digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového generátoru na bázi PXI modulárního systému.

5.3 Část zobrazování průběhu generování

V poslední části mého programu (viz. Obr. 5.11) můžeme vidět zobrazovací část. Tato zobrazovací část slouží pro kontrolu podoby digitálně modulovaného signálu, pro měření případné chyby na výstupu generátoru a pro indikaci stavu generování.

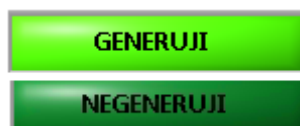


Obrázek 5.11: Část určená pro zobrazování stavu generování



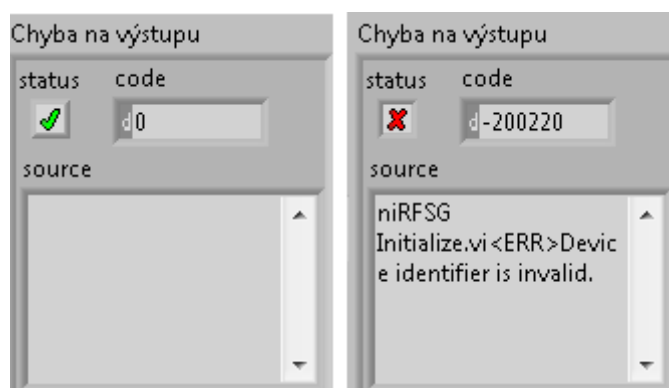
Obrázek 5.12: Konstelační diagram

Na obrázku (viz. Obr. 5.12) vidíme konstelační diagram, který zobrazuje právě generovaný digitálně modulovaný signál v reálném čase. Při změně zadaných parametrů digitálně modulovaného signálu dojde k přepsání konstelačního diagramu a k zapsání nových dat.



Obrázek 5.13: Indikace stavu generování

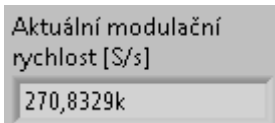
Indikace stavu generování (viz. Obr. 5.13) zobrazuje v reálném čase stav generátoru. Tedy zobrazuje, jestli generátor generuje signál či nikoliv.



Obrázek 5.14: Indikace chyby na výstupu

Indikace chyby na výstupu (viz. Obr. 5.14) nám zobrazuje případnou chybu při generování signálu a popisuje, k jaké chybě došlo a kde k dané chybě došlo.

Návrh a implementace aplikace pro generování digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového generátoru na bázi PXI modulárního systému.



Obrázek 5.15: Měření modulační rychlost

Kontrolní blok (viz. Obr. 5.15) slouží pro kontrolu programem vypočítané modulační rychlosti. Můžeme zde zjistit, zda nedošlo při výpočtu k případné chybě.

6 Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro generování digitálně modulovaného signálu.

V této kapitole jsem ověřoval funkčnost mého programu z grafického vývojového prostředí LabVIEW na reálném hardware od firmy National Instruments. Mou aplikaci jsem ovládal vektor signálový generátor s označením NI PXI-5670.

Pro tato experimentální měření jsem využíval měřicí soustavu, která se skládá z vektorového generátoru NI PXI-5670 a z vektorového analyzátoru NI PXI-5661 (viz.Obr. 6.1). Vektor signálový generátor NI PXI-5670 se skládá z kontroléru (NI PXI-8196), upkonvertoru (NI PXI-5610) a generátoru libovolného průběhu (PXI-5421). Vektor signálový analyzátor NI PXI-5661 se skládá z kontroléru (NI PXI-8106), downkonvertoru (NI PXI-5600) a z rychlého digitizéru (NI PXI-5142). Přenosový kanál byl realizován za pomoci koaxiálního kabelu z důvodu snahy vytvořit co nejlepší přenosový kanál pro měření.



Obrázek 6.1: Měřicí soustava

Zabýval jsem se vlivem parametrů, které simulují reálný přenosový kanál, na parametry:

- EVM – RMS a EVM peak
- MER

Parametry, které simulují reálný přenosový kanál jsou:

- Bílý šum
- Fázový šum
- I a Q DC offset
- Nerovnováha zisku
- Chyba ortogonalita

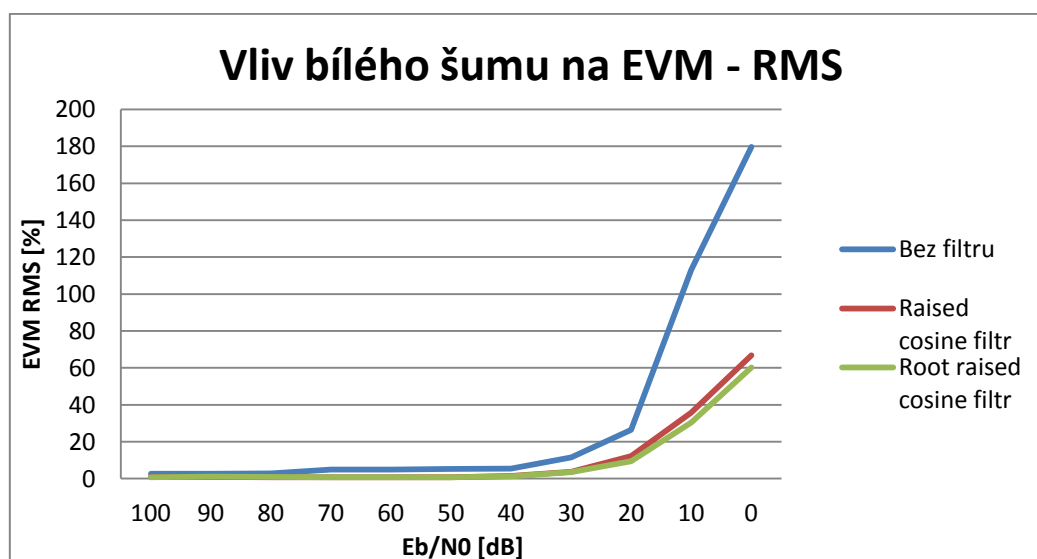
Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro generování digitálně modulovaného signálu.

6.1 Měření vlivu bílého šumu

V tomto měření jsem sledoval vliv velikosti bílého šumu (E_b/N_0) a typu použitého filtru na parametry, které určují kvalitu signálu, MER a EVM – RMS (viz. Tab. 6.1).

Tabulka 6.1: Měření vlivu bílého šumu

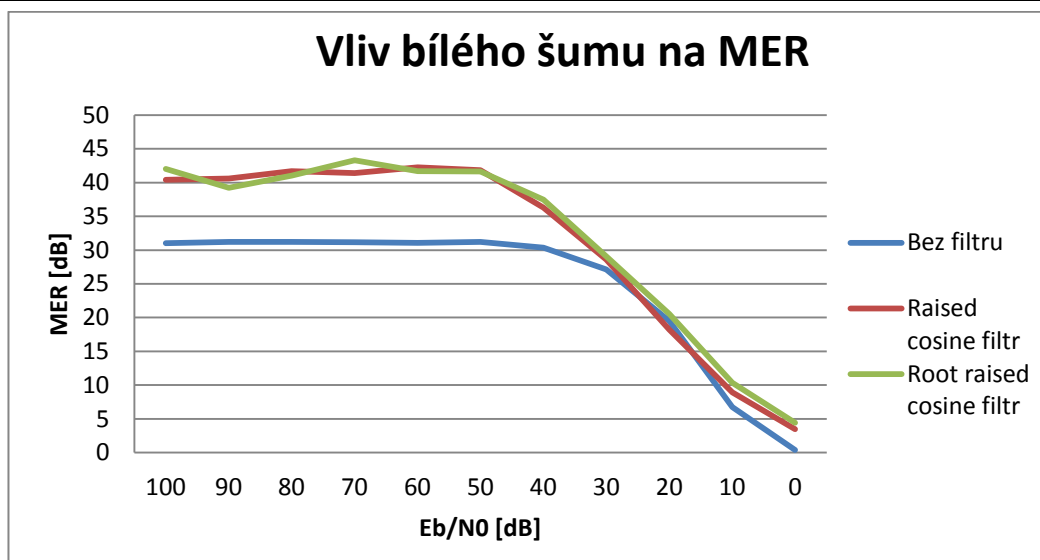
	Bez filtru			Raised cosine filtr			Root raised cosine filtr		
	EVM			EVM			EVM		
E_b/N_0 [dB]	MER [dB]	Peak [%]	RMS [%]	MER [dB]	Peak [%]	RMS [%]	MER [dB]	Peak [%]	RMS [%]
100	31,04	5,22	2,74	40,39	2,01	0,96	42,01	1,86	0,79
90	31,22	5,38	2,75	40,60	2,23	0,93	39,23	2,65	1,09
80	31,19	5,53	2,76	41,71	1,94	0,82	41,01	2,16	0,89
70	31,15	2,77	4,96	41,39	2,00	0,85	43,29	1,51	0,68
60	31,06	2,80	4,91	42,27	1,67	0,77	41,67	1,72	0,82
50	31,19	2,76	5,24	41,82	2,05	0,81	41,63	2,15	0,83
40	30,38	3,03	5,44	36,30	4,22	1,53	37,45	3,03	1,34
30	27,15	4,37	11,49	28,61	9,00	3,71	29,08	8,09	3,52
20	19,52	10,56	26,35	18,21	32,75	12,29	20,56	22,25	9,38
10	6,76	45,91	113,08	8,93	100,58	35,77	10,35	90,09	30,37
0	0,41	95,35	179,65	3,49	178,15	66,90	4,41	139,01	60,21



Obrázek 6.2: Vliv bílého šumu na EVM – RMS

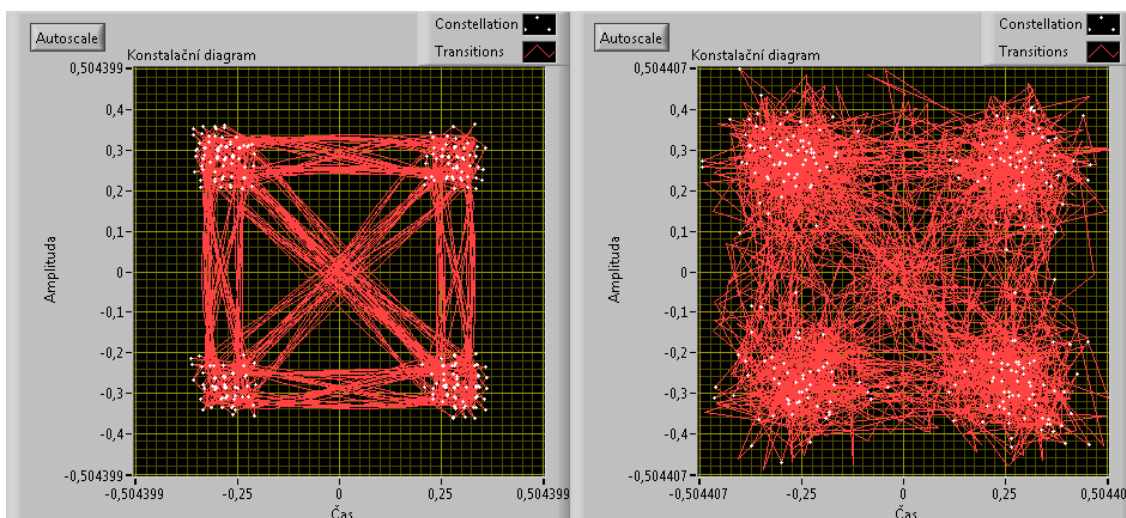
Z grafu vidíme (viz. Obr. 6.12), že použití filtru Raised cosine i Root raised cosine výrazně ovlivňuje velikost EVM RMS [%]. Bez použití filtru dosahovala hodnota EVM RMS až 180%, což znamená, že signál byl zcela zašuměný. Při použití filtrů dosahovala hodnota EVM – RMS v případě Raised cosine filtru až 66,9% a v případě Root raised cosine filtru až 60,21%, což také znamená výraznou nečitelnost signálu. U všech tří možností se začal výrazněji uplatňovat bílý šum od hodnoty přibližně $E_b/N_0 = 30$ dB.

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro generování digitálně modulovaného signálu.



Obrázek 6.3: Vliv bílého šumu na MER

Graf (viz. Obr. 6.3) zobrazuje vliv bílého šumu na parametr MER. Opět můžeme vidět, že použití filtrů má výrazný pozitivní vliv na hodnotu parametru MER. Nejvíce byl bílým šumem ovlivněn signál bez použitého filtru, který při hodnotě — dosahoval hodnoty 0,41 [dB], dále pak dosahovala hodnota MER u Raised cosine filtru [dB] a u Root Raised cosine filtru 4,41 [dB].



Obrázek 6.4: Konstelační diagramy vlivu bílého šumu při hodnotě —

Konstelační diagram (viz. Obr. 6.4) zobrazuje signál na straně generování při hodnotě — rovné 100dB a 20 dB a při použití Root raised cosine filtru. Při snižování hodnoty — pod 20 dB docházelo již k značnému zkreslení a signál se stal nečitelným.

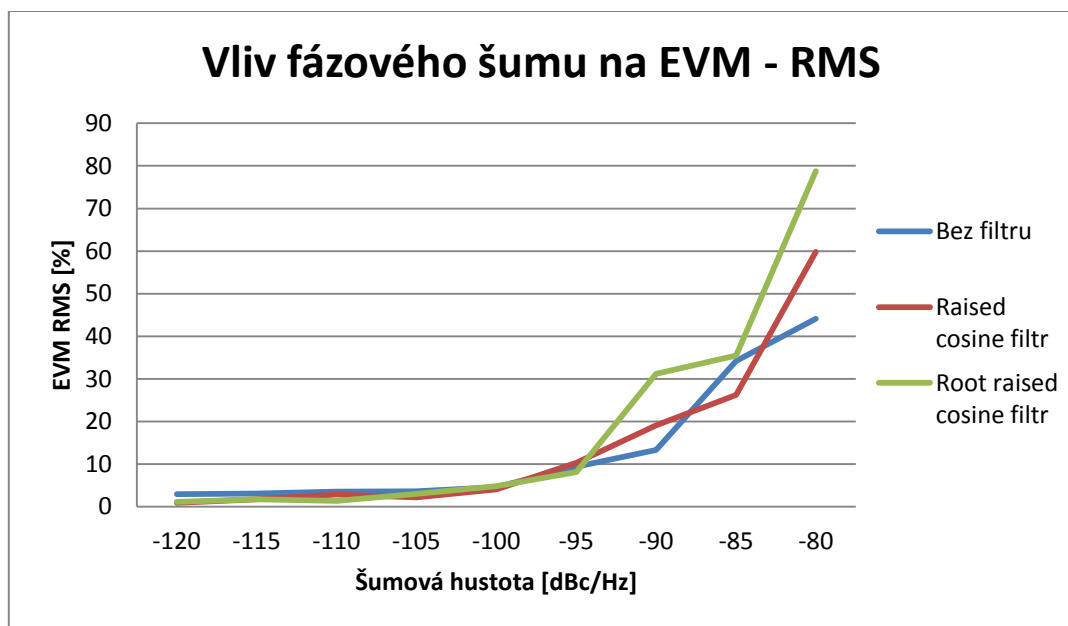
Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro generování digitálně modulovaného signálu.

6.2 Měření vlivu šumové hustoty (fázového šumu)

V tomto měření jsem sledoval vliv velikosti fázového šumu tedy parametru šumové hustoty [dBc/Hz] a typu použitého filtru na parametry, které určují kvalitu signálu, MER a EVM-RMS (viz. Tab. 6.2).

Tabulka 6.2: Měření vlivu fázového šumu

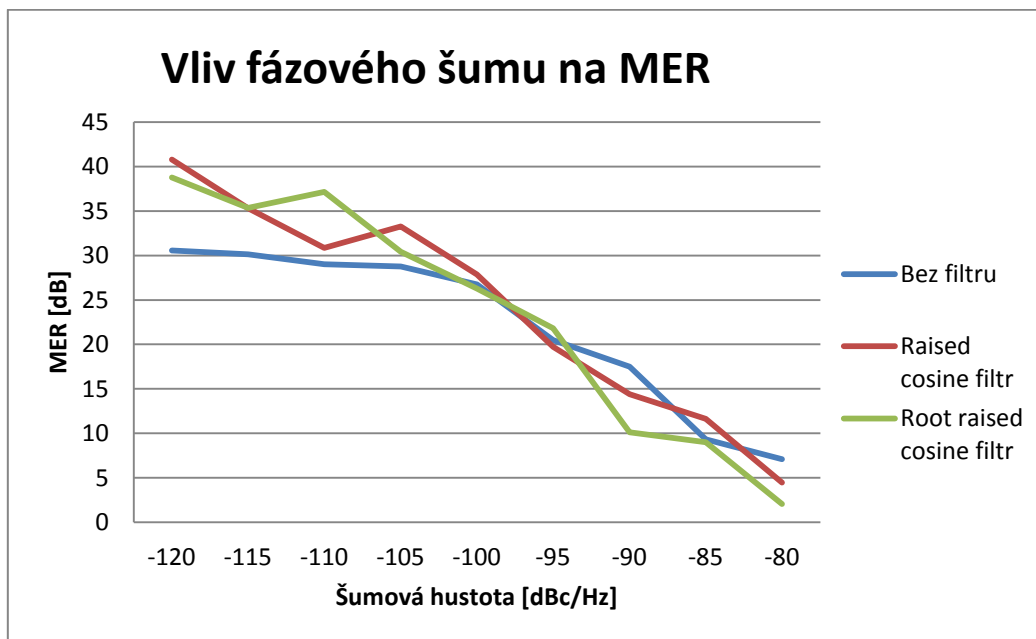
	Bez filtru			Raised cosine filtr			Root raised cosine filtr		
	EVM			EVM			EVM		
Šumová hustota [dBc/Hz]	MER [dB]	peak [%]	RMS [%]	MER [dB]	peak [%]	RMS [%]	MER [dB]	peak [%]	RMS [%]
-120	30,56	7,34	2,96	40,76	2,03	0,92	38,77	2,97	1,15
-115	30,11	6,78	3,12	35,31	4,02	1,72	35,36	5,48	1,71
-110	29,00	6,82	3,55	30,85	5,71	2,87	37,16	4,07	1,39
-105	28,77	8,94	3,64	33,25	5,11	2,17	30,43	7,64	3,01
-100	26,76	11,57	4,59	27,87	11,49	4,04	26,28	17,47	4,85
-95	20,50	35,04	9,44	19,72	23,51	10,33	21,82	21,51	8,11
-90	17,51	35,91	13,32	14,39	46,34	19,08	10,11	68,21	31,21
-85	9,32	72,46	34,19	11,63	64,08	26,21	9,00	98,87	35,50
-80	7,11	118,70	44,09	4,46	167,76	59,83	2,07	174,76	78,76



Obrázek 6.5: Vliv fázového šumu na EVM-RMS

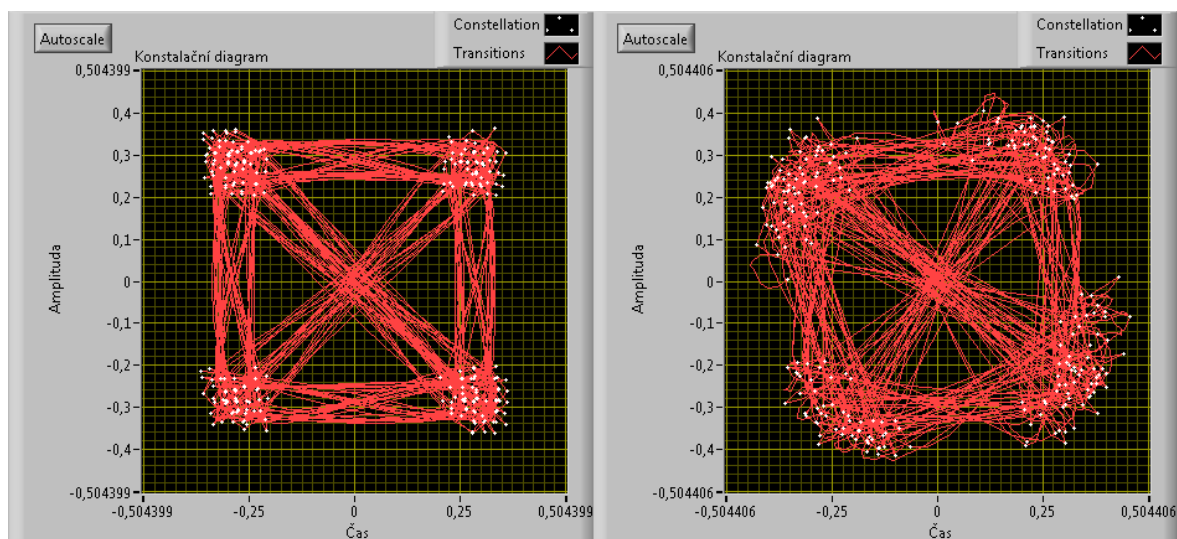
Z grafu vidíme (viz. Obr. 6.5), že použití filtrů při změnách šumové hustoty se projevilo hlavně u nižších hodnot šumové hustoty. Fázový šum se začal projevovat od hodnot šumové hustoty přibližně -105 [dBc/Hz]. Při hodnotě šumové hustoty rovné -80 [dBc/Hz] dosahovala hodnota EVM-RMS při použití signálu bez filtru 44,09 [%], při použití Raised cosine filtru 59,83 [%] a při použití Root raised cosine filtru 78,76 [%].

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro generování digitálně modulovaného signálu.



Obrázek 6.6: Vliv fázového šumu na MER

Graf vlivu fázového šumu (viz. Obr. 6.6) zobrazuje vliv šumové hustoty [dBc/Hz] na parametr MER [dB]. Nejvíce se fázový šum projevil při hodnotě rovné -80[dBc/Hz] při použití filtru Root raised cosine, kdy hodnota MER byla 2,07 [dB]. Při stejné hodnotě šumové hustoty, tedy -80[dBc/Hz], a při použití Raised cosine filtru bylo MER = 4,46 [dB] a bez použití filtru MER = 7,11 [dB].



Obrázek 6.7: Konstelační diagramy vlivu fázového šumu pro šumovou hustotu rovnou

-120 a -90 [dBc/Hz]

Konstelační diagramy (viz. Obr. 6.7) zobrazují signál při parametru šumové hustoty rovné -120 a -90 [dBc/Hz] a při použití Root raised cosine filtru. U fázového šumu, tedy parametru šumové hustoty vyšší než -90 [dBc/Hz] se stal signál nečitelným.

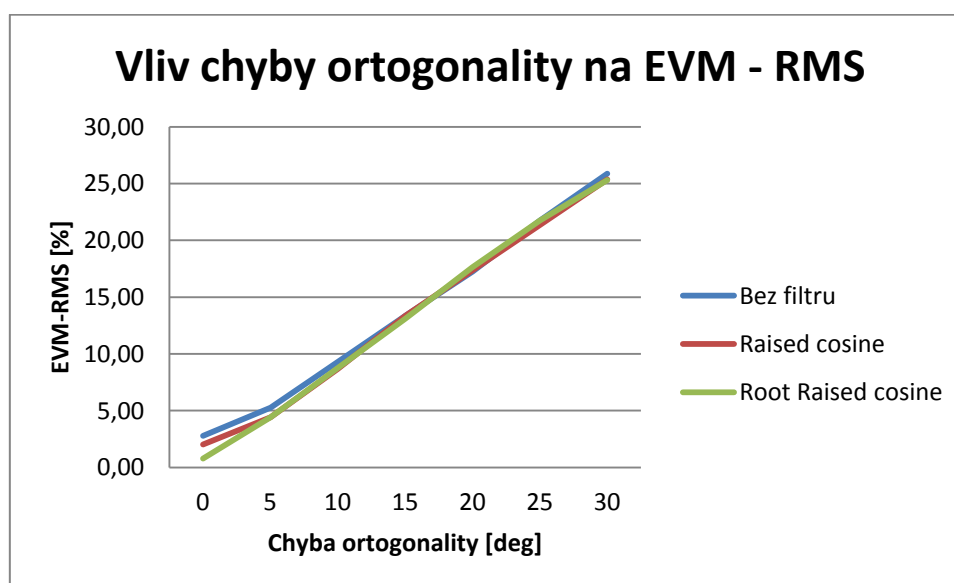
Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro generování digitálně modulovaného signálu.

6.3 Měření vlivu chyby ortogonality

V tomto měření jsem sledoval vliv velikosti chyby ortogonality [deg] a typu použitého filtru na parametry, které určují kvalitu signálu, MER a EVM – RMS.

Tabulka 6.3: Měření vlivu chyby ortogonality

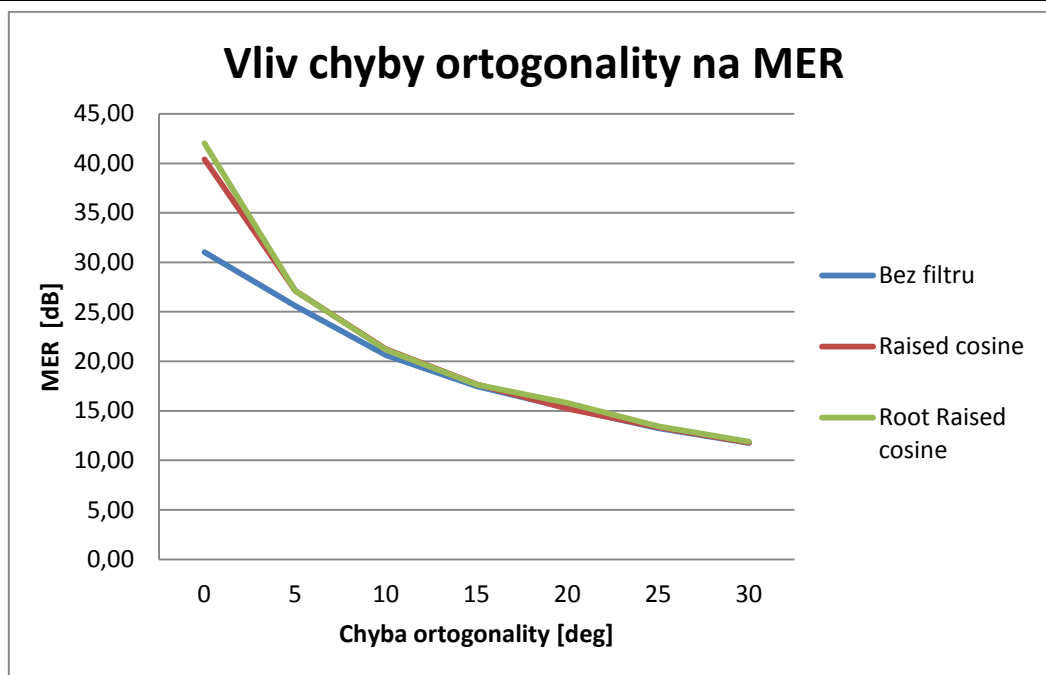
	Bez filtru			Raised cosine			Root Raised cosine		
		EVM			EVM			EVM	
Chyba ortogonality [deg]	MER [dB]	peak [%]	RMS [%]	MER [dB]	peak [%]	RMS [%]	MER [dB]	peak [%]	RMS [%]
0	31,04	4,99	2,78	40,39	0,96	2,01	42,01	1,86	0,79
5	25,58	9,22	5,26	27,13	5,48	4,41	27,10	5,12	4,41
10	20,63	13,68	9,30	21,23	10,32	8,68	21,16	10,17	8,75
15	17,49	17,56	13,35	17,69	14,30	13,34	17,65	14,81	13,11
20	15,27	22,60	17,24	15,21	18,73	17,36	15,80	22,60	17,63
25	13,24	26,60	21,77	13,33	25,03	21,35	13,45	25,75	21,77
30	11,76	31,66	25,87	11,78	28,90	25,37	11,90	30,60	25,32



Obrázek 6.8: Vliv chyby ortogonality na EVM-RMS

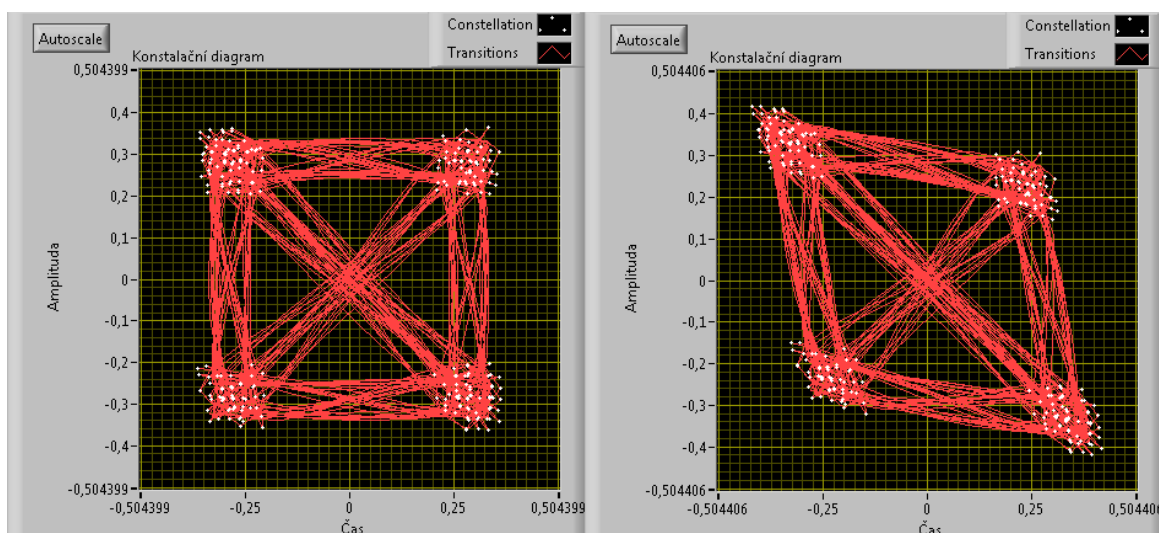
Graf (viz. Obr. 6.8) zobrazuje vliv chyby ortogonality na EVM-RMS. V tomto měření vidíme, že použití filtrů mělo jen minimální vliv při zvyšování hodnoty chyby ortogonality na hodnotu EVM-RMS. Při hodnotě chyby ortogonality 30 stupňů se hodnoty EVM-RMS pohybovali od 25,32 do 25,87 procent.

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro generování digitálně modulovaného signálu.



Obrázek 6.9: Vliv chyby ortogonality na MER

Na grafu (viz. Obr.6.9) vidíme vliv chyby ortogonality na MER. V tomto případě opět nemělo použití filtrů velký vliv na výsledný průběh. Při zvyšování chyby ortogonality docházelo k poklesu MER u všech měřených signálů o přibližně shodné hodnoty. Při chybě ortogonality 30 stupňů byly hodnoty MER v rozmezí od 11,76 do 11,90 dB.



Obrázek 6.10: Konstelační diagram vlivu chyby ortogonality

Na konstelačním diagramu (viz. Obr. 6.10) vidíme vliv chyby ortogonality na digitálně modulovaný signál. Vlevo vidíme chybu ortogonality 0 stupňů a na pravé straně chybu ortogonality 20 stupňů. Chyba ortogonality se projevuje kvadraturním zkosením digitálně modulovaného signálu.

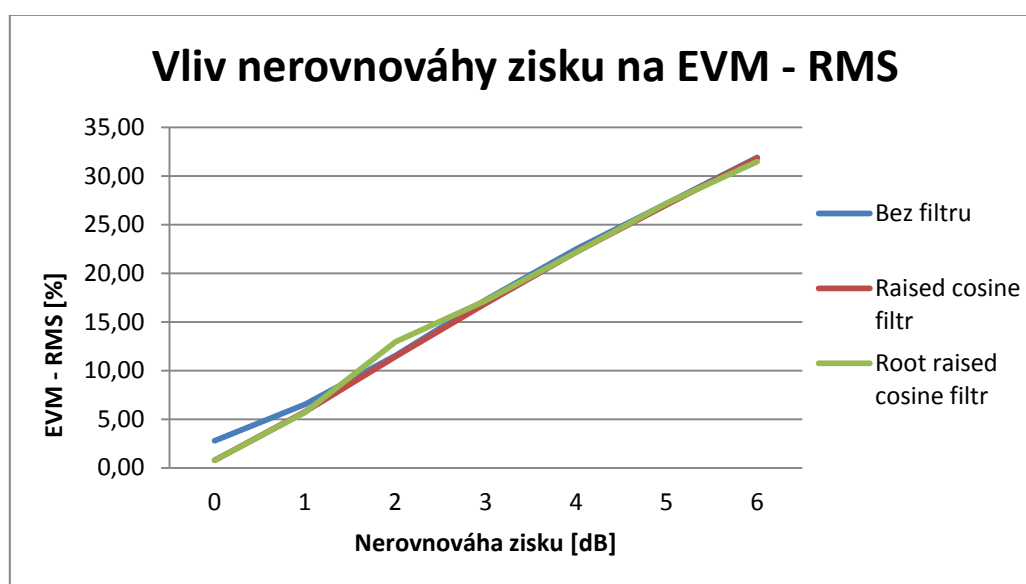
Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro generování digitálně modulovaného signálu.

6.4 Měření vlivu nerovnováhy zisku

V tomto měření jsem sledoval vliv velikosti nerovnováhy zisku [dB] a typu použitého filtru na parametry, které určují kvalitu signálu, MER a EVM–RMS.

Tabulka 6.4: Měření vlivu nerovnováhy zisku

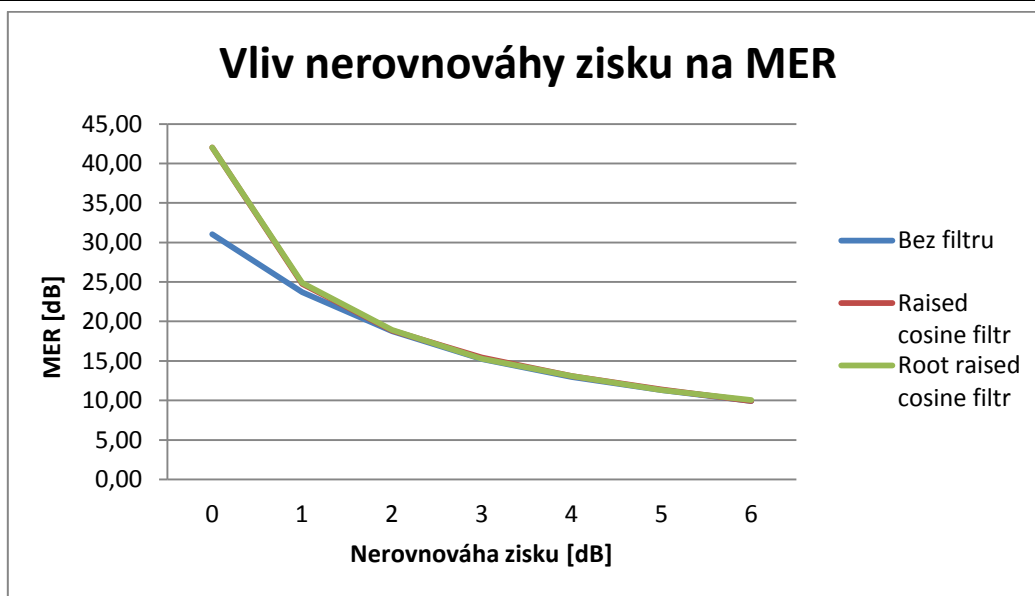
	Bez filtru			Raised cosine filtr			Root raised cosine filtr		
	EVM			EVM			EVM		
nerovnováha zisku [dB]	MER [dB]	peak [%]	RMS [%]	MER [dB]	peak [%]	RMS [%]	MER [dB]	peak [%]	RMS [%]
0	31,04	4,99	2,78	42,01	1,86	0,79	42,01	1,86	0,79
1	23,72	11,06	6,52	24,75	7,92	5,79	24,89	7,31	5,70
2	18,77	18,49	11,52	18,84	14,13	11,43	18,91	11,34	12,95
3	15,25	23,17	17,27	15,45	21,47	16,88	15,29	21,85	17,20
4	12,98	30,78	22,48	13,08	24,72	22,19	13,09	25,74	22,17
5	11,32	36,73	27,16	11,37	34,63	27,02	11,31	31,70	27,20
6	9,92	37,65	31,90	9,94	36,87	31,84	10,04	44,69	31,48



Obrázek 6.11: Vliv nerovnováhy zisku na EVM – RMS

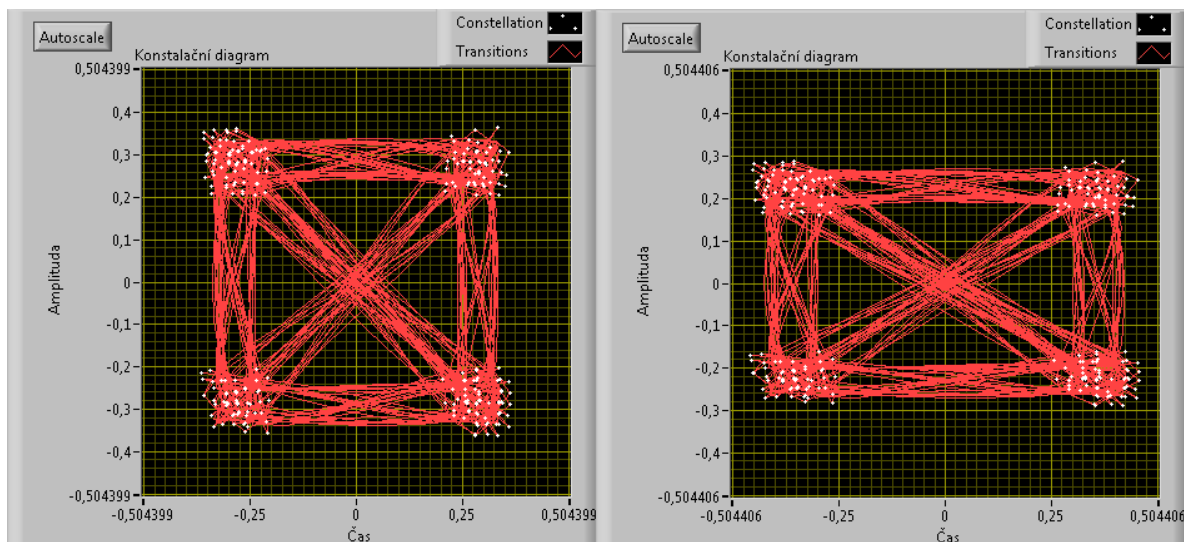
Graf (viz. Obr. .11) zobrazuje vliv nerovnováhy zisku[dB] na EMV-RMS[%]. V tomto měření vidíme, že použití filtrů mělo jen minimální vliv při zvyšování hodnoty nerovnováhy zisku na hodnotu EVM-RMS. Při hodnotě nerovnováhy 6 dB se hodnoty EVM-RMS pohybovali od 31,48 do 31,90 procent.

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro generování digitálně modulovaného signálu.



Obrázek 6.12: Vliv nerovnováhy zisku na MER

V grafu (viz. Obr.6.12) vidíme vliv nerovnováhy zisku na MER. V tomto případě opět nemělo použití filtrů velký vliv na výsledný průběh. Při zvyšování nerovnováhy zisku docházelo k poklesu MER u všech měřených signálů o přibližně shodné hodnoty. Při nerovnováze zisku 6 dB byly hodnoty MER v rozmezí od 9,92 do 10,04 dB.



Obrázek 6.13: Konstelační diagram vlivu nerovnováhy zisku

Na konstelačním diagramu (viz. Obr. 6.13) vidíme vliv zvyšování nerovnováhy zisku. Na obrázku vlevo vidíme konstelační diagram s hodnotou chyby nerovnováhy zisku 0 dB. Na pravé straně vidíme konstelační diagram s hodnotou chyby nerovnováhy zisku 5 dB.

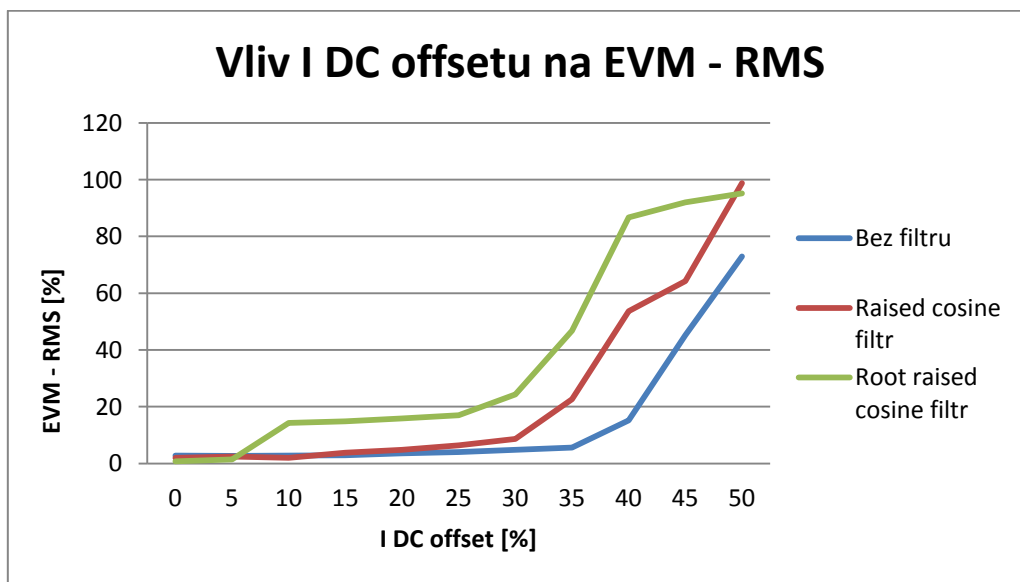
Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro generování digitálně modulovaného signálu.

6.5 Měření vlivu I DC offsetu

V tomto měření jsem sledoval vliv velikosti I DC offsetu [%] a typu použitého filtru na parametry, které určují kvalitu signálu, MER a EVM – RMS.

Tabulka 6.5: Měření vlivu I DC offsetu

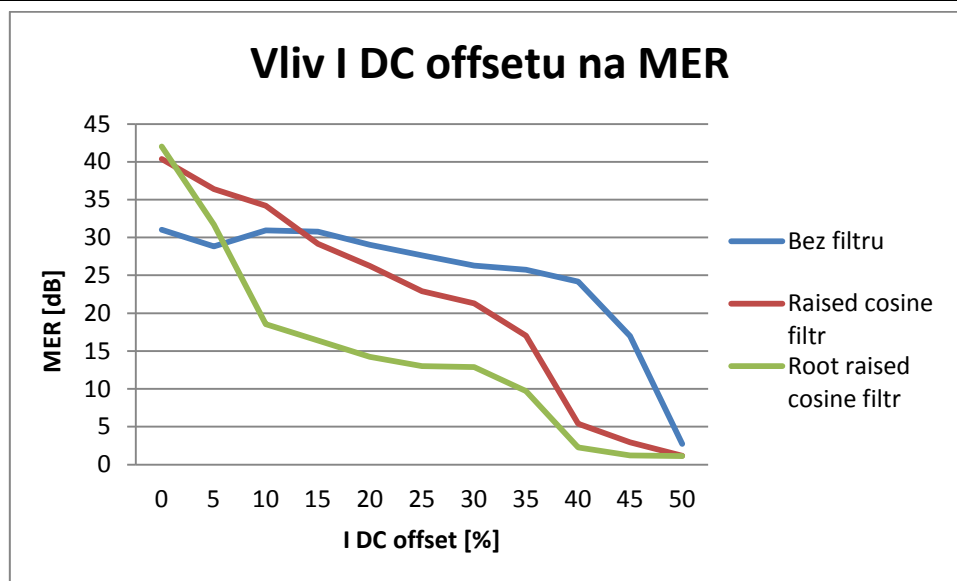
	Bez filtru			Raised cosine filtr			Root raised cosine filtr		
	EVM			EVM			EVM		
I DC offset [%]	MER [dB]	peak [%]	RMS [%]	MER [dB]	peak [%]	RMS [%]	MER [dB]	peak [%]	RMS [%]
0	31,04	4,99	2,78	40,39	0,96	2,01	42,01	1,86	0,79
5	28,81	5,4	2,64	36,41	1,86	2,45	31,70	3,64	1,46
10	30,96	5,41	2,74	34,22	3,46	1,95	18,55	26,54	14,30
15	30,78	5,98	2,89	29,17	5,46	3,76	16,39	27,61	14,89
20	29,04	6,4	3,53	26,23	8,30	4,83	14,25	28,77	15,89
25	27,64	6,88	4,01	22,89	11,57	6,39	13,01	29,29	17,01
30	26,29	9,45	4,85	21,28	14,34	8,63	12,88	30,12	24,35
35	25,74	9,01	5,55	17,03	39,77	22,64	9,72	68,18	46,71
40	24,16	9,91	15,2	5,41	109,05	53,67	2,27	100,98	86,73
45	16,97	98,14	45,21	2,96	140,97	64,26	1,22	134,96	91,95
50	2,75	192,1	72,9	1,17	178,45	98,78	1,14	145,74	95,12



Obrázek 6.14: Vliv I DC offsetu na EVM – RMS

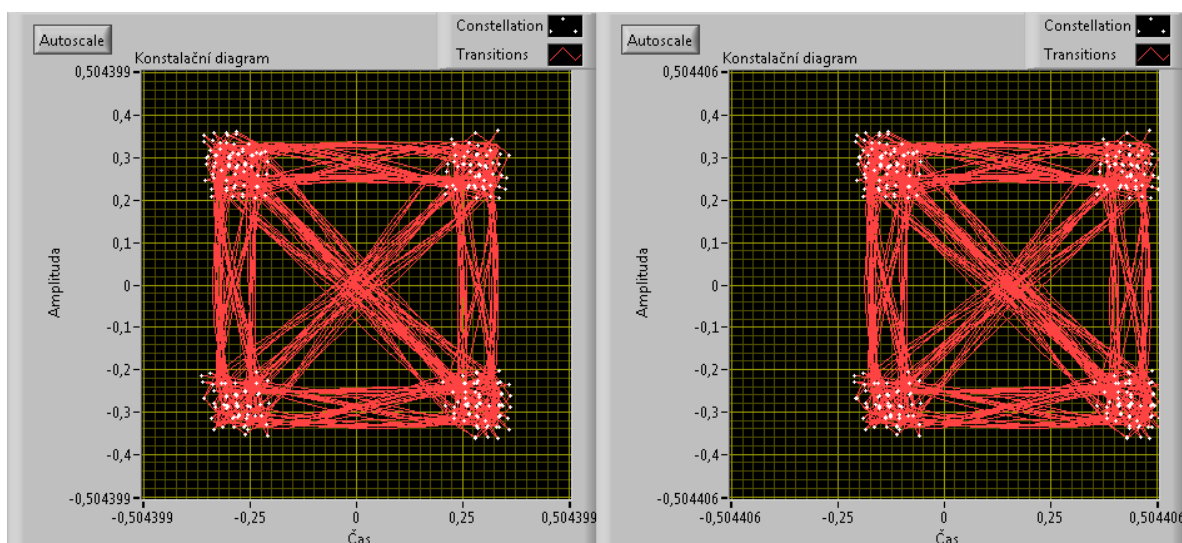
Graf (viz. Obr. 6.14) zobrazuje vliv I DC offsetu na EVM-RMS. Signál bez použití filtru vykazoval menší degradaci pro všechny hodnoty I DC offsetu. Signál bez filtru nabýval při hodnotě I DC offsetu 50% hodnoty EVM-RMS 72,93%. Největší degradaci signálu jsem pozoroval u signálu s filtrem Raised cosine, který nabýval hodnoty EVM-RMS 98,78% při I DC offsetu rovném 50%. Při stejné hodnotě I DC offsetu nabývala hodnota EVM-RMS 95,12% u filtru Root Raised Cosine.

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro generování digitálně modulovaného signálu.



Obrázek 6.15: Vliv I DC offsetu na MER

Při měření vlivu I DC offsetu (viz. Obr. 6.15) na MER jsem zjistil, že oba filtry mají negativní dopad na podobu signálu při zvyšování I DC offsetu. Při hodnotě I DC offsetu 50% byly hodnoty MER pro signál bez filtru 2,75 dB, pro Raised cosine filtr 1,17 dB a pro Root raised cosine filtr 1,14 dB.



Obrázek 6.16: Konstelační diagram vlivu I DC offsetu

Na konstelačním diagramu (viz. Obr. 6.16) vidíme vliv I DC offsetu na digitálně modulovaný signál při 0% a při 30%. Došlo k posunu středu konstelačního diagramu z počátečního bodu.

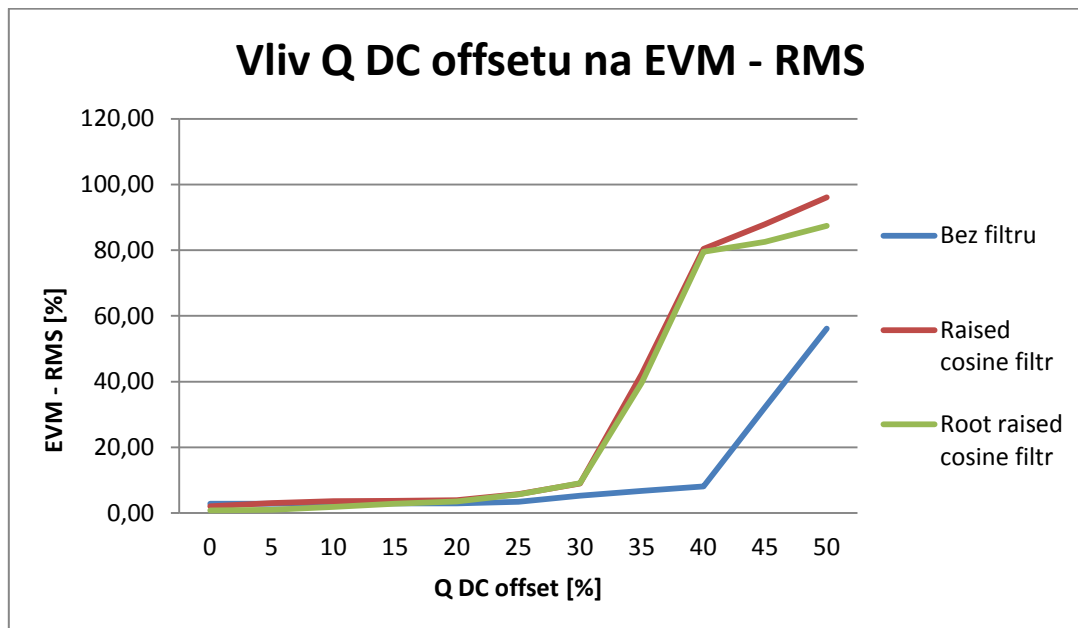
Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro generování digitálně modulovaného signálu.

6.6 Měření vlivu Q DC offsetu

V tomto měření jsem sledoval vliv velikosti Q DC offsetu [%] a typu použitého filtru na parametry, které určují kvalitu signálu, MER a EVM – RMS.

Tabulka 6.6: Měření vlivu Q DC offsetu

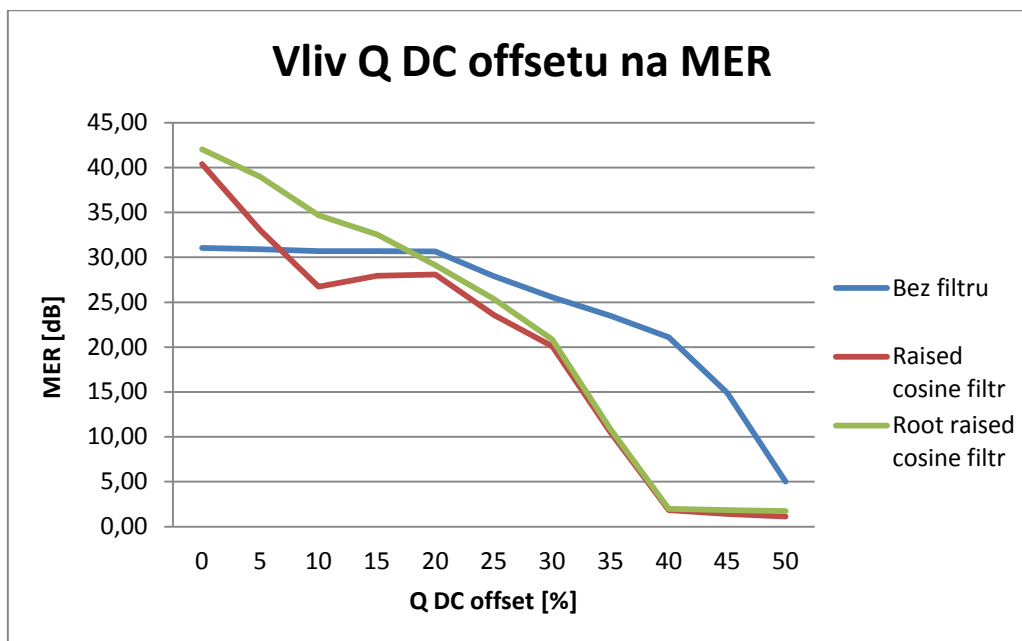
	Bez filtru			Raised cosine filtr			Root raised cosine filtr		
	EVM			EVM			EVM		
Q DC offset [%]	MER [dB]	peak [%]	RMS [%]	MER [dB]	peak [%]	RMS [%]	MER [dB]	peak [%]	RMS [%]
0	31,04	4,99	2,78	40,39	0,96	2,01	42,01	1,86	0,79
5	30,89	5,00	2,80	32,99	2,96	3,05	38,96	2,46	1,02
10	30,70	5,01	2,92	26,72	5,48	3,65	34,70	3,08	1,84
15	30,68	5,42	2,91	27,96	4,99	3,69	32,56	5,03	2,85
20	30,65	5,62	2,90	28,10	4,90	3,93	29,12	6,27	3,50
25	27,89	7,69	3,41	23,59	7,82	5,78	25,36	8,00	5,64
30	25,55	9,76	5,29	20,09	11,01	8,98	20,83	10,14	9,09
35	23,49	12,56	6,69	10,49	112,98	42,31	10,85	97,10	39,68
40	21,08	14,32	8,05	1,83	202,37	80,36	1,99	187,67	79,50
45	14,89	76,89	32,19	1,42	212,60	87,89	1,85	190,10	82,59
50	5,01	147,52	56,17	1,12	221,40	96,10	1,75	196,74	87,45



Obrázek 6.17: Vliv Q DC offsetu na EVM – RMS

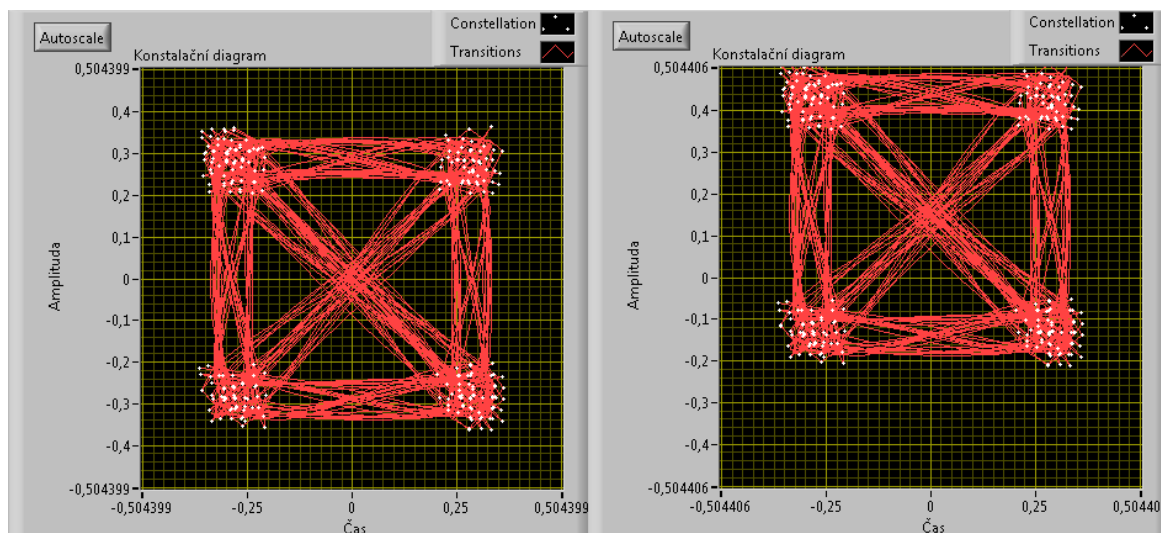
Graf (viz. Obr. 6.17) zobrazuje vliv Q DC offsetu na EVM-RMS. Signál bez použití filtru vykazoval menší degradaci pro většinu hodnot Q DC offsetu. Signál bez filtru nabýval při hodnotě Q DC offsetu 50% hodnoty EVM-RMS 56,17%. Největší degradaci signálu jsem pozoroval u signálu s filtrem Raised cosine, který nabýval hodnoty EVM-RMS 96,10% při I DC offsetu rovném 50%. Při stejné hodnotě I DC offsetu nabývala hodnota EVM-RMS 87,45% u filtru Root Raised Cosine.

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro generování digitálně modulovaného signálu.



Obrázek 6.18: Vliv Q DC offsetu na MER

Při měření vlivu Q DC offsetu (viz. Obr. 6.18) na MER jsem zjistil, že oba filtry mají negativní dopad na podobu signálu při zvyšování Q DC offsetu. Při hodnotě Q DC offsetu 50% byly hodnoty MER pro signál bez filtru 5,01 dB, pro Raised cosine filtr 1,12 dB a pro Root raised cosine filtr 1,75 dB.



Obrázek 6.19: Konstelační diagram vlivu Q DC offsetu

Na konstelačním diagramu (viz. Obr 6.19) vidíme vliv Q DC offsetu na digitálně modulovaný signál při 0% a při 30%. Došlo k posunu středu konstelačního diagramu z počátečního bodu.

7 Závěr

V prvních teoretických kapitolách této diplomové práce jsem se zabýval popisem vlastností digitálně modulovaných signálů, degradačními vlivy, které na digitálně modulovaný signál působí, druhy vyhodnocení degradačních vlivů působících na digitálně modulovaný signál a také jsem zde popsal rozdělení přístrojů pro generování digitálně modulovaných signálů. Dále jsem popsal blokový diagram pro generování digitálně modulovaného signálu, podle kterého jsem vytvářel základy algoritmu pro generování digitálně modulovaného signálu.

V praktické části této diplomové práce jsem vytvořil funkční aplikaci sloužící pro generování digitálně modulovaného signálu, s využitím modulace QPSK, v grafickém vývojovém prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit. Aplikace realizuje generování ideálního digitálně modulovaného signálu a také umožňuje uživateli signál degradovat bílým šumem, fázovým šumem a chybami I a Q složky. Tato aplikace pracuje na reálném hardwaru vyrobeném firmou National Instruments, přesněji na vektor signálovém generátoru s označením NI PXI-5670, který je založen na PXI modulárním systému. Vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o virtuální přístroj, je možné tuto aplikaci a generátor ovládat přes internet s využitím funkce připojení ke vzdálené ploše.

K ověření funkčnosti aplikace jsem využíval již zmíněný vektor signálový generátor a také vektor signálový analyzátor, rovněž od firmy National Instruments s označením NI PXI-5660.

S využitím mé aplikace jsem realizoval reálný přenos digitálně modulovaného signálu a prováděl jsem měření vlivů degradací signálu na parametry, které popisují kvalitu digitálně modulovaného signálu, a to MER a EVM. Také jsem pozoroval velikost vlivu všech degradací při změně použitého filtru. Mezi měřené degradace signálu patřily: velikost bílého šumu, velikost fázového šumu, chyba ortogonality, I a Q DC offset a nerovnováha zisku. Pro ukázkou jsem v této diplomové práci také uvedl konstelační diagramy vlivu jednotlivých degradací.

V dnešní době se již používá digitálně modulovaný signál v mnoha užitečných aplikacích a oblastech, jako jsou například telekomunikační služby, přenos dat a GPS technologie. Virtuálními přístroji pro tvorbu digitálně modulovaného signálu může patřit budoucnost, zvláště v odvětvích zabývajících se problematikou přenosu dat. Pro tato odvětví je nejdůležitější efektivní využití nových technologií.

Použitá literatura

- [1] PETERKA, Jiří. Druhy přenosu - I. [online]. 2011, s. 3 [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://www.earchiv.cz/a98/a844k180.php3>
- [2] HOCHMAN, Radko. Konvergence telekomunikačních a informačních technologií. [online]. s. 5 [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://www.itpoint.cz/voip/?i=konvergence-v-ict-10>
- [3] MODERNÍ RADIOTECHNIKA. 1. vyd. Praha: BET - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-132-2.
- [4] KUNDU, Sudakshina. Analog and Digital Communications. Nové Dillí: Pearson Education, 2010. ISBN 978-81-317-3187-1.
- [5] ŽÍDEK, Jan. Digitální modulace. Ostrava, 2010. Výukový materiál. VŠB - TUO. Vedoucí práce Jan Žídek.
- [6] ANALÝZA DIGITÁLNĚ MODULOVANÝCH SIGNÁLŮ S VYUŽITÍM HARDWAROVÉ PLATFORMY V PODOBĚ PXI VEKTOR SIGNÁLOVÉHO ANALYZÁTORU A KNIHOVNÍCH FUNKCÍ Z DOPLŇKOVÉ KNIHOVNY MODULATION TOOLKIT. MARTÍNEK, Radek. VŠB - TUO. Měření v informačních a komunikačních technologiích [online]. [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/martinekradek/teaching>
- [7] SÝKORA, Jan. ČVUT. Teorie digitální komunikace. Dotisk 1. vyd. Praha: ČVUT, 2005, xiii, 329 s. ISBN 80-010-2478-4.
- [8] PECHAČ, Pavel a Stanislav ZVÁNOVEC. Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2007, 199 s. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [9] ŽÍDEK, Jan. Přístroje na měření chybovosti. Ostrava, 2007. Výukový materiál. VŠB - TUO. Vedoucí práce Jan Žídek.
- [10] Modulation Error Ratio (MER) and Error Vector Magnitude (EVM) [online]. s. 3 [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/3652/en>
- [11] B+K PRECISION CORPORATION. FUNCTION GENERATOR AND ARBITRARY WAVEFORM GENERATOR: GUIDEBOOK [online]. 2010 [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://www.bkprecision.com/downloads/pdf/BK-Function-Generator-and-AWG-Guidebook.pdf>
- [12] ŽÍDEK, J. VŠB - TU OSTRAVA. Grafické programování ve vývojovém prostředí LabVIEW: Skripta FEI [online]. [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/FAQ/labview/VI_Skripta.pdf
- [13] Understanding RF signal generator specifications [online]. č. 1 [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: http://www.radio-electronics.com/info/t_and_m/generators/rf-signal-generator-specs-specifications.php

-
- [14] Produkty pro sběrnici PXI s trvalou přenosovou rychlostí 600 MB/s. [online]. [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34423
- [15] NATIONAL INSTRUMENTS. *Digital Communication System Fundamentals* [online]. 2012 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/373380C-01/usrphelp/digital_system/
- [16] ŽALUD, Václav. Moderní radioelektronika. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2000, 653 s. ISBN 80-860-5647-3.

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: <i>I/Q diagram</i>	5
Obrázek 2.2: <i>Reálná podoba I,Q a kompozitní složky digitálního signálu v čase</i>	6
Obrázek 2.3: <i>Vliv použití Raised Cosine filtru v 8-PSK modulaci</i>	8
Obrázek 2.4: <i>Vektorový diagram GMSK</i>	9
Obrázek 2.5: <i>Vektorový diagram 8-PSK</i>	10
Obrázek 2.6: <i>Vektorový diagram 16-QAM</i>	10
Obrázek 2.7: <i>Modulační chyba a Amplituda chybového vektoru</i>	12
Obrázek 3.1: <i>Využívané bezdrátové standardy [6]</i>	14
Obrázek 4.1: <i>Blokové schéma digitálního přenosového řetězce [15]</i>	19
Obrázek 4.2: <i>Blokové schéma digitálního přenosového řetězce – realizace v LabVIEW</i>	21
Obrázek 4.3: <i>blok „Generate System Parameters“</i>	22
Obrázek 4.4: <i>blok "MT Bit Generation"</i>	22
Obrázek 4.5: <i>blok "Generate Filter Coefficients"</i>	22
Obrázek 4.6: <i>blok "Modulate PSK"</i>	22
Obrázek 4.7: <i>blok pro simulaci reálných podmínek přenosového kanálu</i>	23
Obrázek 4.8: <i>blok "Add AWGN"</i>	23
Obrázek 4.9: <i>blok "apply IQ Impairments"</i>	23
Obrázek 4.10: <i>blok „Add Phase noise“</i>	24
Obrázek 5.1: <i>Část nastavení parametrů a výpočtu vzorkovací frekvence</i>	25
Obrázek 5.2: <i>Část tvorby digitálně modulovaného signálu s danými parametry</i>	26
Obrázek 5.3: <i>Část určená pro simulaci reálných podmínek přenosového kanálu</i>	26
Obrázek 5.4: <i>Část zahájení generování signálu</i>	27
Obrázek 5.5: <i>Cyklické generování digitálně modulovaného signálu</i>	28
Obrázek 5.6: <i>Parametry pro zastavení vnitřního cyklu</i>	29
Obrázek 5.7: <i>Část ukončení generování signálu</i>	29
Obrázek 5.8: <i>Uživatelské rozhraní</i>	30
Obrázek 5.9: <i>Část pro nastavení parametrů generování</i>	31
Obrázek 5.10: <i>Část určená pro simulaci reálných podmínek přenosového kanálu</i>	32
Obrázek 5.11: <i>Část určená pro zobrazování stavu generování</i>	33
Obrázek 5.12: <i>Konstelační diagram</i>	34
Obrázek 5.13: <i>Indikace stavu generování</i>	34
Obrázek 5.14: <i>Indikace chyby na výstupu</i>	34
Obrázek 5.15: <i>Měření modulační rychlosti</i>	35
Obrázek 6.1: <i>Měřicí soustava</i>	36
Obrázek 6.2: <i>Vliv bílého šumu na EVM – RMS</i>	37
Obrázek 6.3: <i>Vliv bílého šumu na MER</i>	38
Obrázek 6.4: <i>Konstelační diagramy vlivu bílého šumu při hodnotě</i>	38
Obrázek 6.5: <i>Vliv fázového šumu na EVM-RMS</i>	39
Obrázek 6.6: <i>Vliv fázového šumu na MER</i>	40
Obrázek 6.7: <i>Konstelační diagramy vlivu fázového šumu pro šumovou hustotu rovnou</i>	40
Obrázek 6.8: <i>Vliv chyby ortogonalit na EVM-RMS</i>	41
Obrázek 6.9: <i>Vliv chyby ortogonalit na MER</i>	42

<i>Obrázek 6.10: Konstelační diagram vlivu chyby ortogonalit</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 6.11: Vliv nerovnováhy zisku na EVM – RMS</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 6.12: Vliv nerovnováhy zisku na MER</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 6.13: Konstelační diagram vlivu nerovnováhy zisku</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 6.14: Vliv I DC offsetu na EVM – RMS</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 6.15: Vliv I DC offsetu na MER</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 6.16: Konstelační diagram vlivu I DC offsetu</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 6.17: Vliv Q DC offsetu na EVM – RMS</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 6.18: Vliv Q DC offsetu na MER</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 6.19: Konstelační diagram vlivu Q DC offsetu</i>	<i>48</i>

Seznam tabulek

<i>Tabulka 3.1: Porovnání klasické a virtuální instrumentace.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 6.1: Měření vlivu bílého šumu.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 6.2: Měření vlivu fázového šumu.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 6.3: Měření vlivu chyby ortogonality</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 6.4: Měření vlivu nerovnováhy zisku.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 6.5: Měření vlivu I DC offsetu.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 6.6: Měření vlivu Q DC offsetu</i>	<i>47</i>

Seznam příloh

Příloha.A: Generation_of_Digitally_Modulated__Signals.vi.....„na CD“

Příloha.B: Diplomova_prace_STR757.pdf„na CD“

Součástí BP/DP je CD/DVD.

Adresářová struktura přiloženého CD/DVD:

- Generation_of_Digitally_Modulated__Signals.vi
- Diplomova_prace_STR757.pdf